

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

FELIPE AUGUSTO NAZÁRIO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM GERADOR DE ENERGIA
PIEZOELÉTRICA ROTACIONAL QUE APROVEITA O POTENCIAL
EÓLICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Santa Helena, Paraná

2019

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

FELIPE AUGUSTO NAZÁRIO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM GERADOR DE ENERGIA
PIEZOELÉTRICA ROTACIONAL QUE APROVEITA O POTENCIAL
EÓLICO**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de
Ciência da Computação da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná, Campus Santa
Helena, como requisito parcial à obtenção do título
de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Itamar Iliuk

Santa Helena, Paraná

2019

Ficha catalográfica

A large, empty rectangular box with a thin black border, occupying the central portion of the page. It is intended for the entry of a catalog card.

Elaborada pela bibliotecária Cleide Bezerra

TERMO DE APROVAÇÃO

(Modelo disponível nas Normas de TCC do Curso)

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM GERADOR DE ENERGIA PIEZOELÉTRICA ROTACIONAL QUE APROVEITA O POTENCIAL EÓLICO

por

Felipe Augusto Nazário

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às _____ do dia ____ de _____ de 20__ na sala _____ como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação na Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR - Câmpus Santa Helena. O(a) aluno(a) foi arguido pela Banca de Avaliação abaixo assinados. Após deliberação, a Banca de Avaliação considerou o trabalho _____ (aprovado ou reprovado).

Prof. Dr. Itamar Iliuk
(Presidente - UTFPR/Santa Helena)

Prof. Dr. Ângelo Marcelo Tuset
(Avaliador 1 – UTFPR/Ponta Grossa)

Prof. Dr. Davi Marcondes Rocha
(Avaliador 2 - UTFPR/Santa Helena)

Prof. Dra. Giani Carla Ito
(Professor Responsável pelo TCC)

Prof. Dra. Arlete Teresinha Beuren
(Coordenador do curso de Bacharelado em
Ciência da Computação – UTFPR/Santa Helena)

Dedico este trabalho à minha família, por toda
confiança, paciência e amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus acima de tudo, por todas as bênçãos em minha vida. Agradeço também à minha família e amigos, por sempre estarem ao meu lado em minhas decisões, alegrias e tristezas, e por fim, agradeço ao meu grande amigo e orientador Prof. Dr. Itamar Iliuk por sempre acreditar em mim.

A imaginação é mais importante que a ciência, porque a ciência é limitada, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro.

Albert Einstein.

RESUMO

NAZÁRIO, Felipe Augusto. **Análise experimental de um gerador de energia piezoelétrica rotacional que aproveita o potencial eólico**. 2019. 61f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência da Computação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Santa Helena.

Tendo em vista a necessidade de criação de novos meios geradores de energia elétrica sustentáveis, este projeto objetiva a prototipação de um sistema gerador de energia piezoelétrica com aproveitamento eólico. Para o desenvolvimento do protótipo foi utilizado um processo de manufatura aditiva por meio de uma impressora 3D e transdutores piezoelétricos, enquanto para coleta e análise dos dados foram utilizados objetos da plataforma IoT. O processo de desenvolvimento do projeto envolve adição de uma folha na extremidade do transdutor piezoelétrico e adição de massa para encontrar maiores deflexões. O protótipo aproveita o potencial eólico para uma movimentação rotacional em seu eixo central e a excitação produz deflexões favoráveis e contrárias ao sentido do vento que incide na superfície da folha adicionada. Este trabalho encontrou resultados satisfatórios quanto à geração de energia com potências variando até aproximadamente $5 \mu\text{W}$, e sobre o aproveitamento da movimentação dos transdutores com ventos de incidência de até 6 m/s. Ao final do experimento verificou-se que a velocidade do vento de incidência, a velocidade de rotação e adição da massa na extremidade da estrutura intensificou o grau de deflexão do transdutor piezoelétrico. Este apresenta à comunidade acadêmica uma forma alternativa de se trabalhar com geradores de energia piezoelétrica mesmo com limitações quanto a recursos a serem utilizados.

Palavras-chave: Piezoelétrico. IoT. Internet das coisas. Impressão 3D.

ABSTRACT

NAZARIO, Felipe Augusto. **Experimental Analysis of a rotational piezoelectric energy generator which harnesses the wind potential**. 2019. 61p. Work of Conclusion Course (Graduation in Computer Science) – Federal Technology University – Paraná. Santa Helena.

Considering the need to create new sustainable electricity generating means, this project goals to prototyping a piezoelectric energy generating system with wind power. For the development of the prototype, an additive machining process was used through a 3D printer and piezoelectric transducers, while IoT platform objects were used for data collection and analysis. The design development process involves adding a sheet at the end of the piezoelectric transducer and adding mass to find larger deflections. The prototype takes advantage of the wind potential for a rotational movement on its central axis and the excitation produces favorable and contrary deflections to the direction of the wind that strikes the surface of the added leaf. This work found satisfactory results regarding the energy generation with powers varying up to approximately $5 \mu\text{W}$, and on the use of the transducers movement with incidence winds up to 6 m/s. At the final of the experiment it was found that the incidence wind speed, speed of rotation and addition of mass at the end of the structure intensified the degree of deflection of piezoelectric transducer. It presents to the academic community an alternative way of working with piezoelectric energy generators, even with limitations on the resources to be used.

Keywords: Piezoelectric. IoT. Internet of things. 3D printers.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Arquitetura dos sistemas de comunicação	20
Figura 2: Cristal de Quartzo.	21
Figura 3: Modelo molecular perovskita com formato cúbico.	22
Figura 4: Efeito Piezoelétrico Direto e Inverso.	23
Figura 5: Esquema elétrico do sintetizador.	24
Figura 6: Pórtico com massa desbalanceada.	26
Figura 7: Sistema <i>energy harvesting</i> não linear.	27
Figura 8: Sistema de Captura de Energia não-ideal.	28
Figura 9: Controle passivo para supressão de movimentos caóticos.	28
Figura 10: Modelo piezoelétrico com controle passivo.	29
Figura 11: Pórtico com controle passivo pendular.	30
Figura 12: Modelo físico do oscilador com controle passivo.	31
Figura 13: Sistema Unimorph com Aplicação de Turbulências.	32
Figura 14: Protótipo do Sistema em Linha.	32
Figura 15: Modelos com transdutor na horizontal e vertical.	33
Figura 16: Resultados Coletados para os dois experimentos.	34
Figura 17: Esquema do moinho de vento piezoelétrico.	35
Figura 18: Gráfico da geração de energia variando carga resistiva e frequência.	35
Figura 19: Fluxograma de funcionamento do sistema.	36
Figura 20: Sensor piezoelétrico MEAS.	38
Figura 21: Gráfico de tensão por grau de deflexão.	38
Figura 22: Energia necessária para operar.	39
Figura 23: Especificação dos pinos.	40
Figura 24: Dimensões do protótipo.	41
Figura 25: Posição de fixação do transdutor no protótipo.	42
Figura 26: Massa da folha triangular.	43
Figura 27: Massa da porca adicionada	43
Figura 28: <i>Spinner</i> utilizado.	44
Figura 29: <i>Spinner</i> fixado na estrutura do protótipo.	45
Figura 30: Protótipo montado.	45

Figura 31: Gráfico de tensão encontrada no sistema sem cargas e com sinais AC....	46
Figura 32: Circuito retificador de onda completa.....	47
Figura 33: Gráfico de tensão encontrada no sistema sem cargas e com sinais DC dispondo de três transdutores em paralelo.....	47
Figura 34: Gráfico de tensão encontrada no sistema sem cargas e com sinais DC dispondo de três transdutores em série.	48
Figura 35: Ponto para fixação do transdutor no protótipo.....	49
Figura 36: Circuito final para a leitura com ESP32.....	50
Figura 37: Fluxograma do funcionamento do ESP32 com a plataforma <i>ubidots</i>	52
Figura 38: Deflexões encontradas das vigas em relação ao sistema sem massa de prova.	54
Figura 39: Gráficos de amostras (A), (B) e (C) representam valores de potência e tensão no espaço de tempo nos minutos 17, 18 e 19 respectivamente; Gráfico (D) de potência e tensão média dos três ensaios efetuados.....	55
Figura 40: Deflexões encontradas.	55
Figura 41: Gráficos de amostras (A), (B) e (C) representam valores de potência no espaço de tempo nos minutos 10, 11 e 12 respectivamente; Gráfico (D) de potência média dos três ensaios efetuados.	56
Figura 42: Gráficos de amostras (A), (B) e (C) representam valores de potência no espaço de tempo nos minutos 52, 53 e 54 respectivamente; Gráfico (D) de potência média dos três ensaios efetuados	58
Figura 43: Gráfico que representa as médias de potência entre os ensaios.	58
Figura 44: Gráfico que representa as médias de tensão geradas entre os ensaios	59

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 1: Especificações de equipamentos <i>Low Power</i> e <i>High Power</i>	25
Quadro 2: Lista de componentes e quantidade utilizada.....	37
Quadro 3: Especificações dos modos de operação do ESP32	40
Quadro 4: Resultados encontrados para os sistemas.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IOT: Internet of Things (Internet das coisas)

MEMS: Micro-Eleto-Mecânicos

CI: Circuitos Integrados

AC: Corrente Alternada

DC: Corrente Contínua

PLA: Ácido Polilático

LISTA DE SÍMBOLOS

μW : Microwatt

mW : Milliwatt

MW : Megawatt

W : Watt

V : Volt

$\text{M}\Omega$: Megaohm

A : Ampere

μA : Microampere

μF : Micro-Farads

mm : Milímetro

cm : Centímetro

m/s : Metros por segundo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Geral	17
1.1.2 Específicos	17
1.2 CONTRIBUIÇÕES	17
1.3 JUSTIFICATIVA	17
1.4 DELIMITAÇÕES	18
2 REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1 ENERGIA LIMPA	19
2.2 INTERNET DAS COISAS	20
2.3 PIEZOELETRICIDADE	21
2.4 ESTADO DA ARTE	24
2.4.1 Sintetizador digital	24
2.4.2 Potência	25
2.4.3 Gerador Piezoelétrico com Motor de Massa Desbalanceada	26
2.4.4 Gerador Piezoelétrico com Excitação Ideal	27
2.4.5 Gerador Piezoelétrico com Excitação não Ideal	27
2.4.6 Controle Passivo para Supressão de Movimento caótico	28
2.4.6 Controle Passivo para Supressão de Movimento Caótico com Pêndulo	29
2.4.6 Gerador Piezoelétrico com Excitação por Turbulencia	31
2.4.7 Gerador Folha para Coleta de Energia Eólica	33
2.4.8 Moinho de Vento Piezoelétrico	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1 COMPONENTES	37
3.1.1 Lista de componentes	37
3.1.2 Transdutor Piezoelétrico MEAS	37
3.1.3 ESP32	39
3.2 PROTOTIPAÇÃO DO SISTEMA	41
3.2.1 Especificações do Protótipo	41
3.2.2 Posicionamento dos Transdutores	42
3.2.3 Folha e Massa	42
3.2.4 Suporte e Movimento	44
3.3 TESTES DE BANCADA	46

3.3.1 Sinais Alternados AC	46
3.3.2 Sinais Constantes DC sem Adição de Carga.....	46
3.3.3 Fixação dos Transdutores	48
3.4 LEITURA DOS DADOS	49
3.4.1 ESP32	49
3.4.2 Ubidots	51
4 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	53
5 CONCLUSÃO.....	60
REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

Os meios geradores de energia elétrica vêm sendo estudados de forma crescente para ampliar os métodos de trabalho, adequar os sistemas às novas tecnologias e implementar novos recursos de conversão de energia com o propósito de diminuir cada vez mais a emissão de poluentes e a utilização de recursos naturais de forma sustentável. Os novos métodos *energy harvesting* (coleta de energia), propõem a conversão de energias naturais como a energia solar, eólica e piezoelétrica em energia elétrica buscando formas que aproveitem o estado físico da natureza sem prejudicá-la.

Visto que a piezoelectricidade é a capacidade de alguns minerais gerarem energia elétrica a partir de distorções mecânicas, se qualifica como uma fonte geradora de energia limpa. Utilizada de forma eficiente, a piezoelectricidade pode gerar energia para dispositivos que funcionem em baixas demandas energéticas.

O avanço dos sistemas de micro-eleto-mecânica (MEMS), sistemas de comunicação sem fio e eletrônica digital criou uma necessidade quanto ao desenvolvimento de dispositivos miniaturizados, com capacidades de detecção, computação e comunicação sem fios a curtas distâncias. Assim sendo, é visível a necessidade de novos meios de abastecimento elétrico sob tais dispositivos, os quais funcionem de forma eficiente quanto a geração de energia limpa, tendo em vista uma geração sustentável de energia, que, por sua vez, venha a diminuir os impactos degradantes na natureza.

Por conseguinte, este projeto demonstra a construção de um protótipo de gerador de energia utilizando transdutores piezoelétricos para ser um meio alternativo para a utilização destes transdutores. O protótipo foi desenvolvido em um processo de manufatura aditiva por meio de uma impressora 3D (três dimensões) e para a geração de energia aproveita o potencial eólico em um movimento rotacional. A coleta dos dados de geração de energia foi feita utilizando uma placa de prototipação e a plataforma *ubidots* com propósito de uso da tecnologia IoT (internet das coisas) para auxílio. Para fins de análise, os dados foram exportados da plataforma *ubidots* e analisados por meio de gráficos construídos com a ferramenta *excel* da *Microsoft*.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Produzir um protótipo de geração de energia elétrica utilizando transdutores piezoelétricos.

1.1.2 Específicos

- 1) Realizar estudo sobre piezoeletricidade;
- 2) Realizar estudo do comportamento dinâmico do sistema proposto;
- 3) Realizar testes sobre a disposição dos transdutores piezoelétricos no esquema elétrico;
- 4) Realizar análise sobre a geração de energia fora do protótipo utilizando osciloscópio;
- 5) Realizar análise sobre a geração de energia com o sistema integrado ao protótipo.

1.2 CONTRIBUIÇÕES

Espera-se com este trabalho, auxiliar estudos sobre novos meios de coleta de energia, visando sistemas geradores de energia limpa para alimentar componentes IoT (Internet of Things) e outros componentes de baixa demanda energética.

1.3 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento deste trabalho acrescentará à comunidade acadêmica um novo meio de se trabalhar com *energy harvesting*. Utilizando o processo de manufatura aditiva para a construção do protótipo tendo como base o PLA (ácido polilático), material biodegradável, implica também em um meio sustentável de se trabalhar com dispositivos geradores de energia elétrica.

1.4 DELIMITAÇÕES

O desenvolvimento deste protótipo de um gerador de energia piezoelétrica limita-se a produção do protótipo em manufatura aditiva e análise da geração de energia piezoelétrica em movimento rotacional. Por difícil acesso a demais produtos transdutores piezoelétricos, este projeto fica limitado a utilização de apenas um modelo do transdutor, o que conseqüentemente afeta a diversidade de resultados encontrados.

Devido as baixas velocidades de vento onde o protótipo foi desenvolvido, não foram realizados testes de campo, com ventos de incidência não constantes. Todos os ensaios foram feitos em laboratório.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 ENERGIA LIMPA

Segundo Marsal (2011), se faz necessário para a evolução um sistema de alimentação de energia elétrica, o qual caracteriza-se como um sistema gerador de energia limpa e que agrida de forma mínima o meio ambiente. Relacionando esse tema ao autor anterior, Triplett e Quinn (2009) definem que se tem investido cada vez mais no estudo da captura de energia, devido à necessidade de energias menores e mais eficientes.

Considerando o estudo de Leichtweis e Palacios Felix (2017), as atuais condições de destruição ambiental deduzem a impossibilidade de que as condições naturais do planeta voltem ao equilíbrio, mas há possibilidades de reversão da situação com o aumento da busca por sustentabilidade energética.

Goldemberg e Lucon (2007) assumem que os padrões de geração de energia por meio de fontes fósseis são prejudiciais por gerarem poluentes nocivos ao meio ambiente e à vida. Goldenberg e Lucon afirmam a necessidade de se investir em energias renováveis de forma efetiva.

Segundo Pacheco (2006), a produção de energias renováveis vem crescendo gradualmente no Brasil, que apresenta cerca de 45% da sua oferta de energia de origem renovável. O autor afirma também a existência dos benefícios da geração de energia vinda de fontes renováveis que, por sua vez, não produzem gases de efeito estufa, que contribui para aumentar a segurança energética.

Os estudos sobre de Harrop (2019) mostram que com o passar do tempo serão adotados cada vez mais os *energy harvesting* para a geração de energia por tendências cada vez mais aparentes como a redução de gases poluentes, conservação de recursos naturais, acesso a eletricidade, mobilidade, saúde, desenvolvimento de países subdesenvolvidos e onipresença de eletroeletrônicos.

2.2 INTERNET DAS COISAS

Segundo Gubbi (2013) o grande avanço dos sistemas micro-eleto-mecânica (MEMS), sistemas de comunicações sem fios, e eletrônica digital, criaram uma necessidade quanto ao desenvolvimento de dispositivos miniaturizados, com capacidades de detecção e computação sem fios à curtas distâncias.

O termo “internet das coisas” se refere à um sistema de objetos com capacidade de serem descobertos, monitorados, controlados ou interagidos com dispositivos eletrônicos que se comunicam através de redes e eventualmente podem se conectar com a internet (Guinard e Trifa, 2016).

Sobre a arquitetura básica dos dispositivos de comunicação (Figura 1), Santos (2016) divide em quatro partes: unidade de processamento de memória, unidade de comunicação, fonte de energia e unidades de sensores/atuadores. A fonte de energia é responsável pelo fornecimento elétrico dos equipamentos e pode ser obtida a partir de baterias ou outras fontes como energia elétrica, solar e captura de energia do ambiente através de técnicas de conversão de energia.

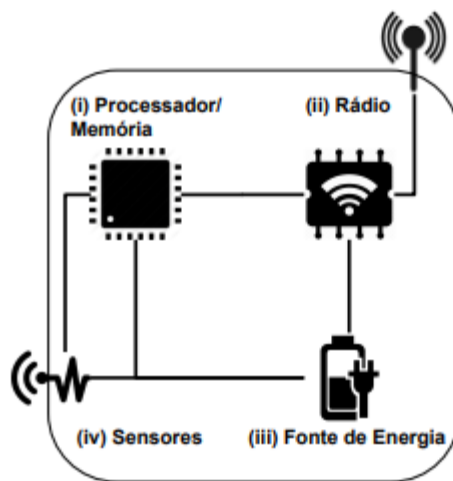


Figura 1: Arquitetura dos sistemas de comunicação

Fonte: Santos (2016).

De Oliveira (2017) afirma que a tendência dos dispositivos é a diminuição em tamanho e quantidade de energia consumida, e que seus consumos dependem diretamente de sua potência, calculada pelo produto da tensão e corrente. Há uma preocupação quanto ao

consumo dos dispositivos conforme é aumentado o número de periféricos adicionados já que a adição de novos periféricos reflete diretamente em um aumento no consumo de energia.

Para Xia (2012), IoT refere-se à interconexão a rede de objetos do cotidiano e aumentará a onipresença da internet. Xia afirma também que o IoT aumentará a interação de cada objeto em uma rede altamente distribuída de dispositivos que se comunicam.

2.3 PIEZOELETRICIDADE

Por definição, a piezoeletricidade é a capacidade que alguns cristais possuem de gerar corrente elétrica em resposta a uma pressão mecânica à qual foram submetidos (JAFTE, COOKE, JAFTE, 2012). Materiais cristalinos desse tipo possuem características distintas, como o fato de não haver um centro de simetria. Nesses casos, tais cristais manifestam momentos elétricos, mesmo na ausência de campos magnéticos externos. Cristais de quartzo, como na Figura 2, são exemplos de materiais que apresentam tais características (SILVA, 2010).



Figura 2: Cristal de Quartzo.

Fonte: Vieira (2018).

A geração de energia elétrica piezoelétrica se dá por meio de sensores baseados em cristais piezoelétricos. Tais cristais possuem uma estrutura do tipo *perovskita*, que quando se encontra a determinada temperatura crítica, denominada temperatura de Curie, apresentam simetria tetragonal em que o centro de simetria das cargas elétricas positivas não coincidem com o centro de simetria das cargas negativas, dando origem a um dipolo elétrico que leva a estrutura cristalina a se deformar na presença de um campo elétrico e gere um deslocamento elétrico quando submetidas a uma deformação mecânica, que caracteriza o efeito piezoelétrico direto e inverso (PEREIRA, 2010).

Segundo Pereira (2010), para conseguir efeitos piezoelétricos, os materiais devem ser fabricados com o formato cúbico denominado perovskita, com formatação ABO_3 , na qual “A” refere-se a cátions divalentes, “B” refere-se a cátions divalentes, trivalentes, tetravalentes ou pentavalentes, e “O” refere-se ao oxigênio. O modelo molecular perovskita pode ser observado na Figura 3.

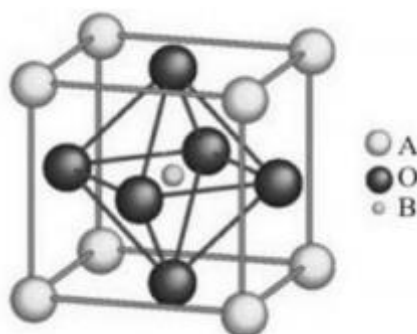


Figura 3: Modelo molecular perovskita com formato cúbico.

Fonte: Vieira (2018).

Essa capacidade de transformar energia traz um leque de possibilidades quanto a sua utilização, pois um sensor piezoelétrico, em sua capacidade máxima, poderia ser utilizado para geração de energia elétrica, abastecendo baterias, apenas dependendo da distorção frequente de sua extremidade, que poderia ser feita na captação adequada de movimentos de corpos como passos em pisos (SILVA, 2010).

Há diversas aplicações para materiais do tipo piezoelétrico como a geração de ultrassom é um exemplo complexo de sua utilização, pois suas ondas são geradas por transdutores que convertem energia mecânica em elétrica e vice-versa (PEREIRA, 2010). Uma utilização usual dos cristais piezoelétricos é feita na captação dos sinais de instrumentos

como violões e guitarras. Basicamente, os sinais vindos de vibrações mecânicas causadas pelo movimento das cordas são transformados em pulsos elétricos e posteriormente ampliados e convertidos em som por meio de amplificadores.

Assim como pode ser verificado na Figura 4, caracterizando o efeito piezoelétrico direto, quando materiais piezoelétricos são submetidos a determinadas distorções mecânicas, apresentam carga elétrica nos eletrodos localizados em sua superfície. Em contrapartida, quando sujeitos a uma diferença de potencial em seus eletrodos, apresentam uma distorção mecânica, caracterizando assim um efeito piezoelétrico inverso (JALILI, 2009).

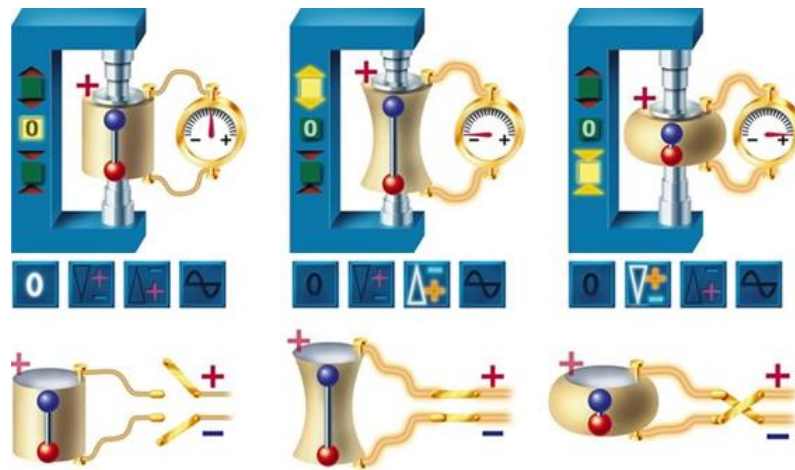


Figura 4: Efeito Piezoelétrico Direto e Inverso.

Fonte: Silva et al (2009).

A estrutura dos sensores piezoelétricos simulam um esquema gerador de energia capaz de gerar carga suficiente para alimentar e manter um sistema IoT. Os sistemas geradores baseados em elementos piezoelétricos possuem maior densidade de energia e elevada eficiência de conversão, melhor acoplamento eletromecânico e grande potencial de miniaturização como estruturas simples. Isso facilita sua integração com as tecnologias de sistemas micro-eleto-mecânicos (MEMS) e circuitos integrados (CI), e ainda há possibilidade de fabricação em massa, quando comparados aos sistemas citados anteriormente (Da Silva et al., 2016).

Para Pereira (2010), foi revolucionário o desenvolvimento das cerâmicas piezoelétricas, que possuem melhores propriedades quando polarizadas se comparadas aos cristais, além de sua estrutura física e flexibilidade.

2.4 ESTADO DA ARTE

2.4.1 Sintetizador digital

Schwengber, Nazário e Iliuk (2016) propuseram a utilização de sensores piezoelétricos em conjunto com a placa de prototipação para o desenvolvimento de um sintetizador digital. A Figura 5 apresenta o esquema elétrico do modelo que foi constituído por 8 (oito) sensores piezoelétricos ligados de formas independentes entre si, utilizando as portas analógicas do Arduino.

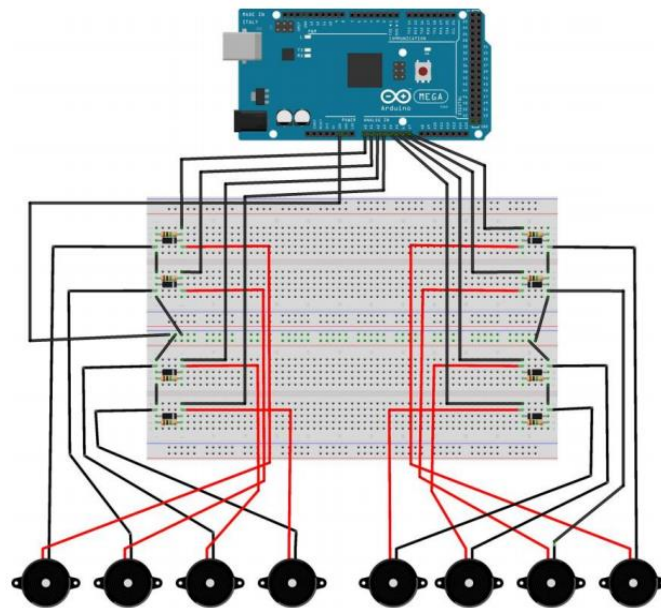


Figura 5: Esquema elétrico do sintetizador.

Fonte: Schwengber, Nazário, Iliuk (2016).

Foram utilizados os sensores piezoelétricos para captar vibrações que seriam convertidas em sinais digitais. Estas vibrações ocorreriam sempre que houvesse um impacto contra a superfície protetora dos sensores. Os sinais capturados deviam acontecer apenas quando houvesse o impacto, porém, foi verificada a captação de ruídos externos como sons de vozes e passos no processo sensorial. O problema foi solucionado com a adição de materiais dielétricos ao circuito para o ajuste da leitura quanto à passagem de corrente e

tensão de ativação dos sensores piezoelétricos, e com o aumento dos parâmetros de níveis de entrada aceitos.

2.4.2 Potência

Para Harrop (2019), os sistemas de captação de energia (*energy harvesting*) possuem características como tempo de vida maior que baterias, não poluição, produção de 0,1 a 10 MW (Megawatt) em funcionamento e necessidade de armazenamento. Foi dividida a geração de energia estudada em *low power* e *high power*, sendo que cada uma se caracteriza pela magnitude da energia gerada em unidades de potência. *Low power* contém valores de potência entre 0,1 μ W (microwatt) e 1W (Watt), enquanto o *high power* contém valores entre 1W (Watt) e 10MW (Megawatt). O quadro 1, apresenta dados sobre principais usos, valor de mercado e características, enquanto a figura 6 mostra alguns tipos de sensores que funcionam dentro da escala *low power* apresentada pelo autor.

Quadro 1: Especificações de equipamentos *Low Power* e *High Power*.

	Low Power	High Power
Energia	0,1 μ W a 1 W	1W a 1 MW
Utilização	Eletrônicos. Sensores, atuadores, transmissão <i>wireless</i> , internet das coisas, carregadores de eletrônicos pessoais.	Engenharia elétrica. Micro e minigeradores, geradores mões, comunidades, veículos, iluminação, prédios, produção química, dessalinização.
Valor de mercado	Baixo. A menos que os desafios dos <i>energy harvesting</i> de dispositivos sem fios/IoT/periféricos sejam resolvidos em outras formas aceitáveis e exista tolerância aos malefícios das baterias.	Grandes e crescendo rapidamente.
Características	Não impulsionado pela legislação, discreto, facilmente acoplado a sistemas, substitui baterias que não estão em um mercado tão durador.	Muitas vezes impulsionado pela legislação de emissores e apoio financeiro, algumas vezes partes de motores geradores não discretos, e utilizados em aplicações duradouras.

Fonte: Adaptado de Harrop (2019).

Sensor (Principle)	DC Voltage (Typical)	Power	Output
ANALOG SENSORS			
Pressure	3 - 5V	1 - 20 mW	Voltage (resistive bridge)
Acceleration	3 - 7 V	3 - 35mW	Voltage (resistive bridge)
Temperature	2.7 - 5.5 V	378 - 600 μ W	Square Wave Period μ Temperature
Humidity	4 - 5.8 V	1 - 3 mW	Output Voltage μ Relative humidity
Gas	2.3- 5 V	< 800 mW	Voltage from bridge
Displacement	3 - 6.3 V	< 1mW	Resistance (voltage o/p sensor)
DIGITAL SENSORS			
Humidity / Temperature	3.3-5.5	3mW	3-wire SPI Interface
Pressure, Temperature	2.1-3.6	6.5mW	3-wire SPI Interface

Figura 6: Exemplos de sensores low power

Fonte: Harrop (2019).

2.4.3 Gerador Piezoelétrico com Motor de Massa Desbalanceada

Nazário e Iliuk (2018), apresentaram um gerador de energia piezoelétrico utilizando um pórtico impresso em um polímero sintético para fixação do transdutor piezoelétrico e um motor de massa desbalanceada para excitação não linear do sistema, gerando uma distorção na estrutura do pórtico em uma determinada frequência no movimento. O sistema proposto pelos autores pode ser verificado pela figura 7.

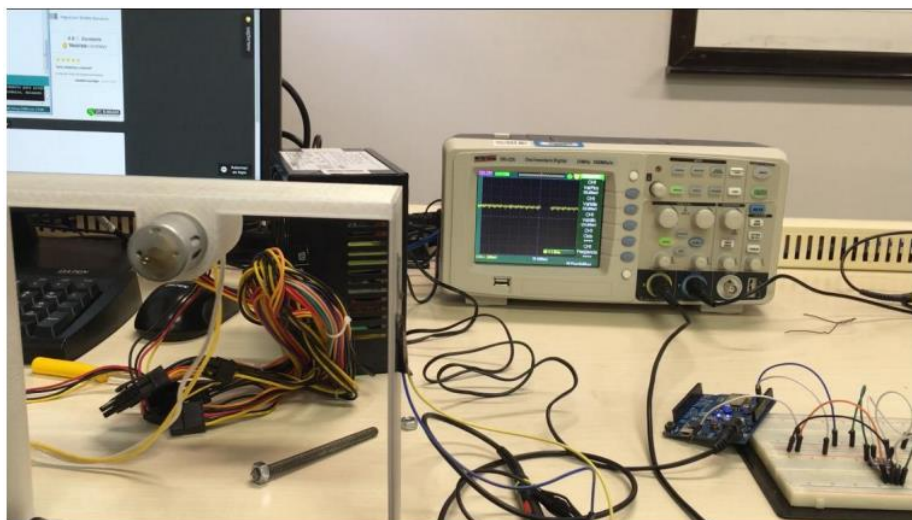


Figura 6: Pórtico com massa desbalanceada.

Fonte: Nazário e Iliuk (2018).

Por meio do estudo deste sistema, os autores obtiveram resultados quanto à geração de energia quando o transdutor é excitado em uma frequência alta enquanto distorcido em um baixo grau de amplitude.

2.4.4 Gerador Piezoelétrico com Excitação Ideal

O modelo sugerido por Triplett e Quinn (2009), assim como na Figura 8, sugere um esquema de excitação de uma base de suporte de uma massa. Tem sua movimentação prevista pela variável $u(t)$, deslocamento relativo através de $z(t)$ e a geração de uma carga “Q”. Também caracteriza o sistema apresentado, uma rigidez k e um amortecimento mecânico denominado b . O elemento (Θ/C) representa o acoplamento piezoelétrico.

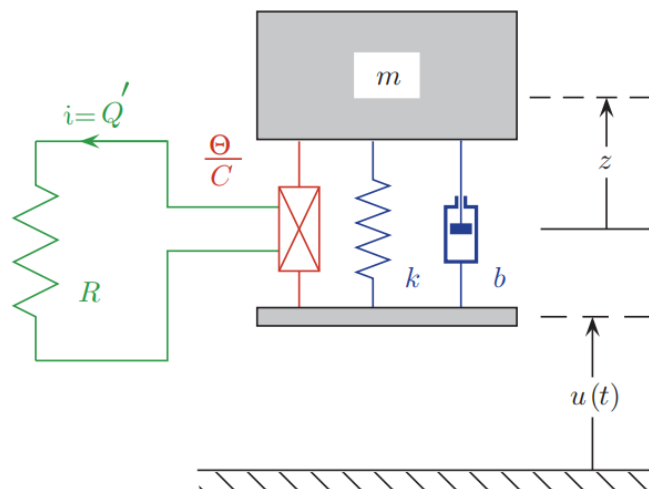


Figura 7: Sistema *energy harvesting* não linear.

Fonte: Triplett e Quinn (2009).

2.4.5 Gerador Piezoelétrico com Excitação não Ideal

O modelo proposto por Iliuk (2016) apresenta uma configuração piezoelétrica *bimorph* caracterizada por camadas piezoelétricas em ambos os lados de uma viga. Apresenta também um motor de massa desbalanceada para a excitação do sistema. O motor, quando acionado, gera vibração na estrutura da viga. Através dos estudos do modelo (Figura 9) pode-se efetuar

uma comparação entre o modelo ideal estudado por Triplett e Quinn e o modelo não ideal proposto.

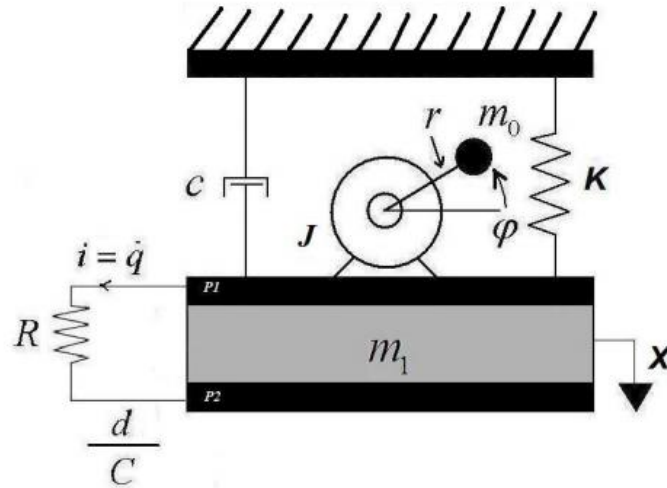


Figura 8: Sistema de Captura de Energia não-ideal.

Fonte: Iliuk (2012).

2.4.6 Controle Passivo para Supressão de Movimento caótico

Para supressões de movimentos caóticos para sistemas como o modelo estudado por Iliuk (2012), foi modelado por Tusset, Balthazar e Felix (2013) um sistema de controle passivo baseado na aplicação de um dissipador de energia não linear (NES) em um sistema não ideal (NIS) como demonstrado na figura 10.

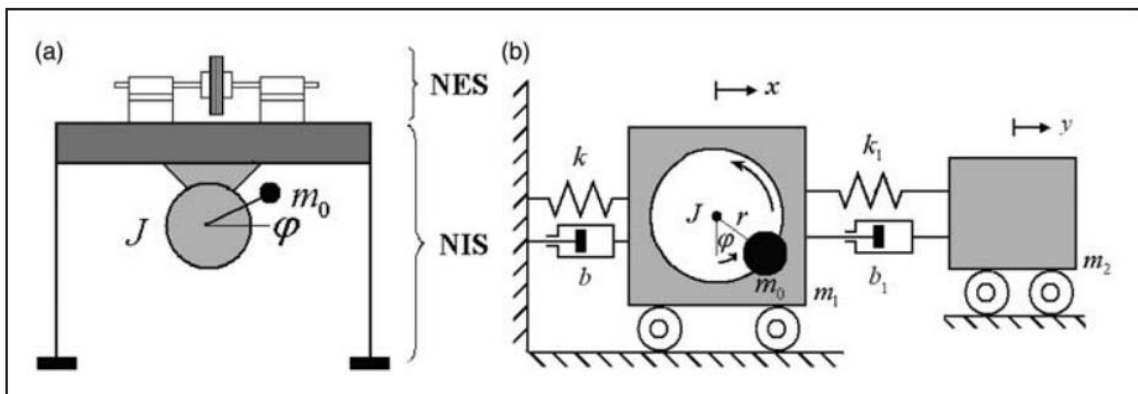


Figura 9: Controle passivo para supressão de movimentos caóticos.

Fonte: Tusset, Balthazar e Felix (2013).

Estudos como o de Tuset, Balthazar e Felix aprimoram o modelo de pórtico com controle passivo de Iliuk (2013a), apresentado pela figura 11, o qual apresenta o controle de movimentos caóticos em sua extremidade superior e duas vigas piezoelétricas (P1 e P2) em sua lateral. Para o modelo proposto é encontrado cargas sobre a resistência apresentada.

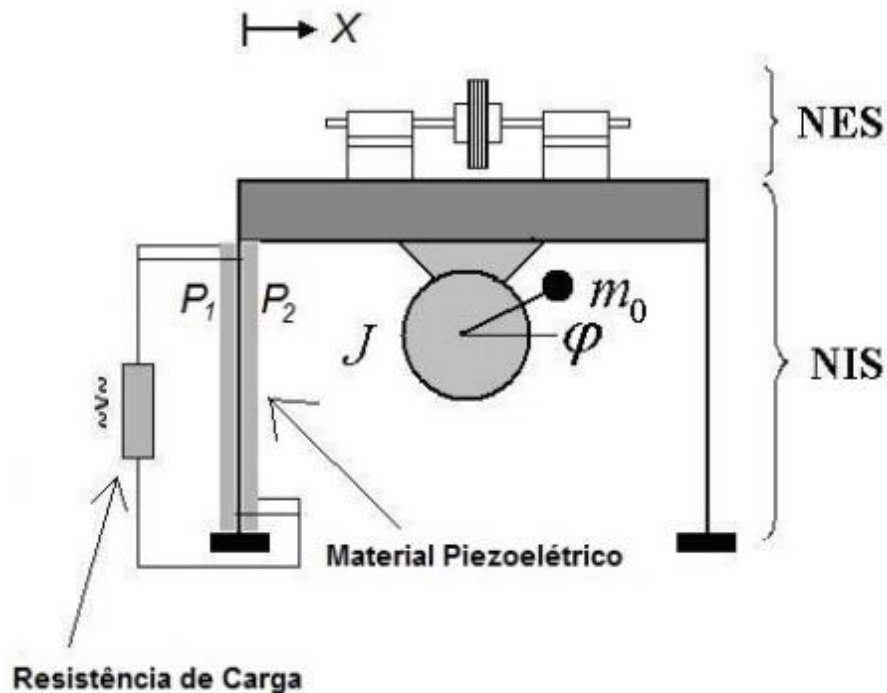


Figura 10: Modelo piezoelétrico com controle passivo.

Fonte: Iliuk (2013a).

2.4.6 Controle Passivo para Supressão de Movimento Caótico com Pêndulo

O modelo piezoelétrico analisado Iliuk et al (2013), assim como o modelo de Iliuk (2016), apresenta um oscilador com controle passivo para supressão de movimento caótico estudado por Tuset, Balthazar e Felix (2013) porém, em um formato pendular, com a utilização de componentes transdutores piezoelétricos como verificado pela figura 12.

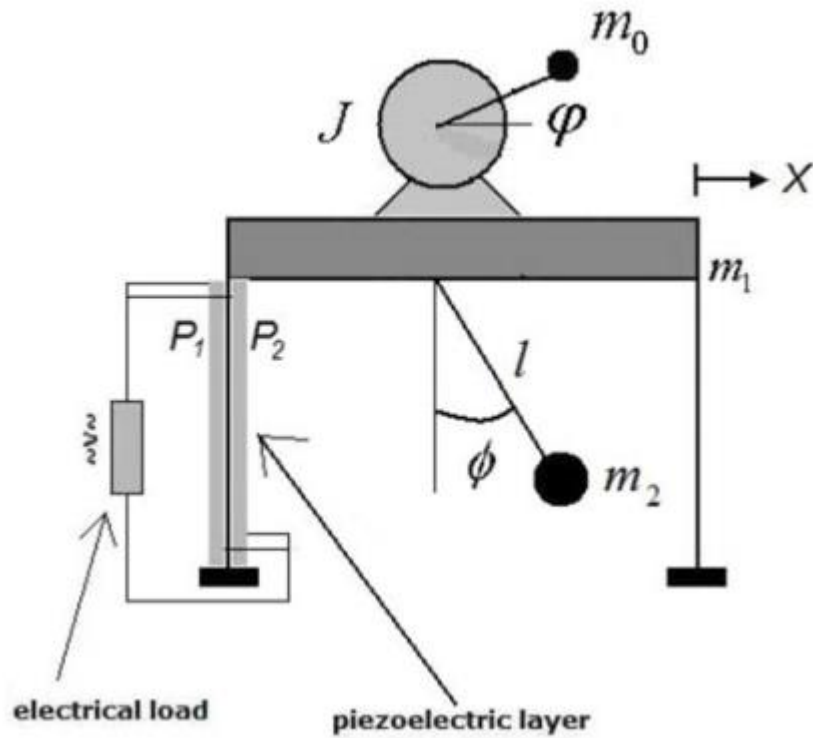


Figura 11: Pórtico com controle passivo pendular.

Fonte: Iliuk (2013b).

O modelo físico do sistema estudado, que pode ser visto pela figura 13, apresenta um motor de massa desbalanceada como oscilador do sistema e um pêndulo funcionando como supressor de movimentos caóticos. Este sistema apresenta também uma constante elástica e um coeficiente de amortecimento.

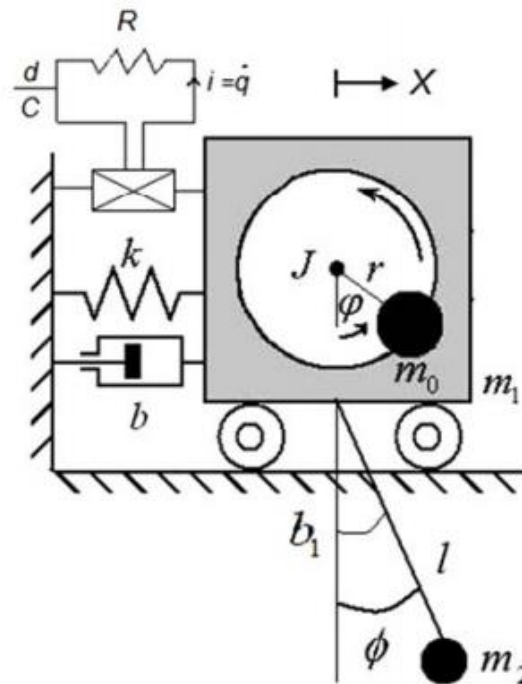


Figura 12: Modelo físico do oscilador com controle passivo.

Fonte: Iliuk (2013b).

2.4.6 Gerador Piezoelétrico com Excitação por Turbulência

O modelo piezoelétrico proposto por Hobeck e Inman (2012) apresenta como característica um transdutor piezoelétrico com configuração unimorph (uma camada piezoelétrica em um lado da viga). A partir de uma força aplicada ao transdutor piezoelétrico por meio de turbulências, o componente se flexiona e gera tensão sobre o componente de carga. A Figura 14 apresenta o modelo proposto.

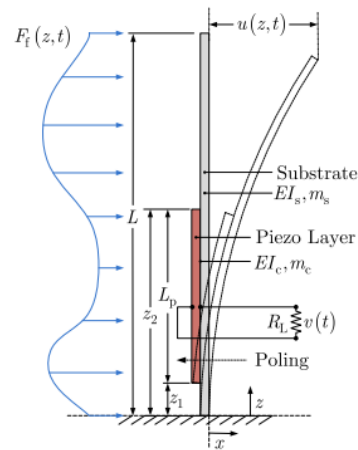


Figura 13: Sistema Unimorph com Aplicação de Turbulências.

Fonte: Hobeck e Inman (2012).

Por meio do estudo deste modelo piezoelétrico acionado por turbulências e simulando um gramado piezoelétrico como na Figura 15, pôde-se encontrar valores razoáveis de saída com potências de 1 mW (*miliwatt*) por cantilever com velocidade de ar médias de 11,5 metros por segundo.

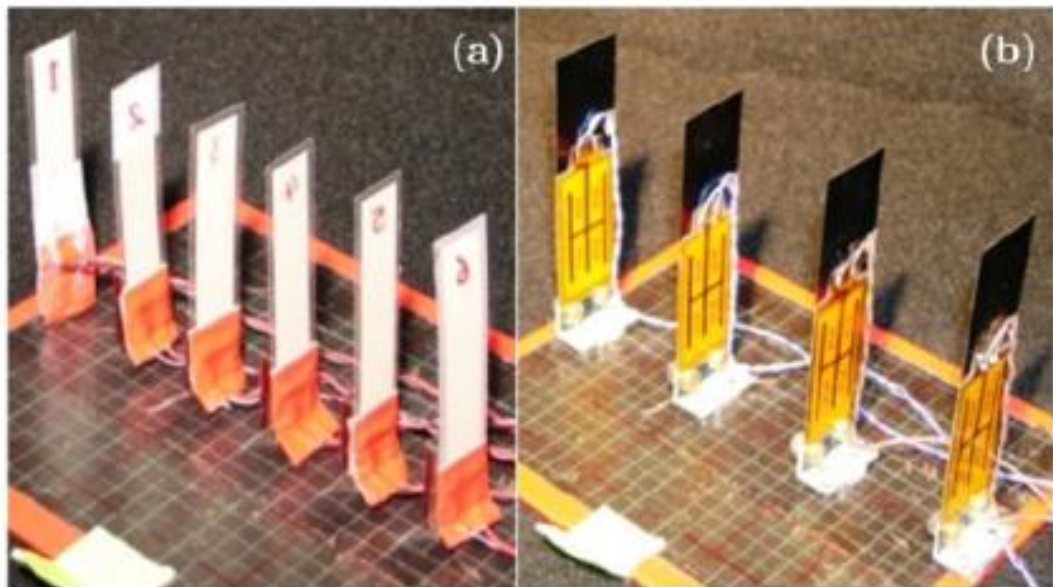


Figura 14: Protótipo do Sistema em Linha.

Fonte: Hobeck e Inman (2012).

2.4.7 Gerador Folha para Coleta de Energia Eólica

Os mecanismos estudados por Li e Lipson (2009) apresentam um transdutor piezoelétrico com adição de uma “folha” na extremidade vista como um sistema de alavanca, impulsionando a estrutura quando atingida por forças externas providas de ventos. Os mecanismos propostos trataram os transdutores nas posições horizontal e vertical, como mostrado na figura 16.

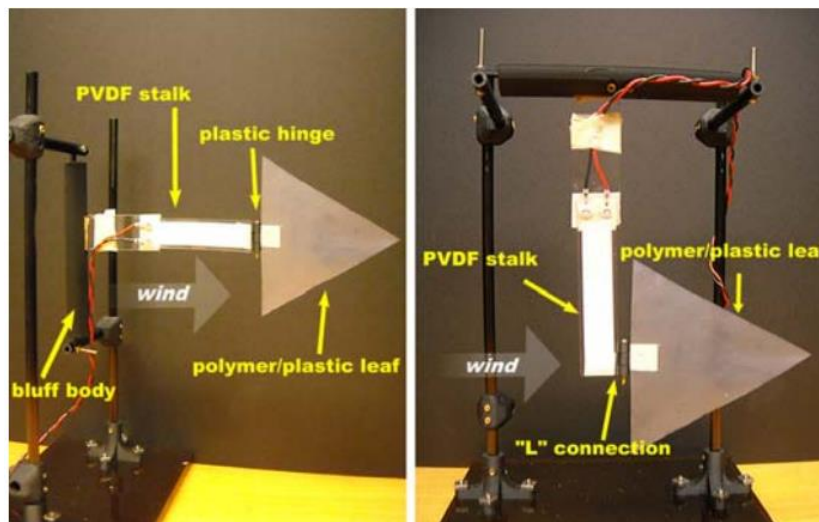


Figura 15: Modelos com transdutor na horizontal e vertical.

Fonte: Li e Lipson (2009).

Como pode ser verificado através da Figura 17, o sistema proposto foi sujeito à testes em diferentes intensidades, aumentando a velocidade (em metros por segundo) em que o vento se dirigia para a estrutura. Puderam ser coletados para as diferentes aplicações sobre uma carga de $10\text{M}\Omega$ (Mega-Ohm) potências em uma escala de μW (Microwatt).

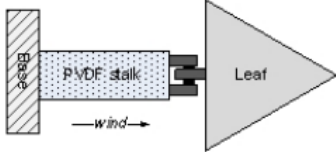
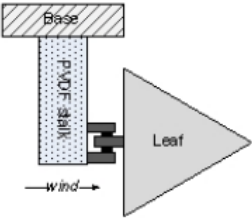
Configuration of Prototype	PVDF element	Max Output Power (Load=10 M Ω , Deviation \approx 6%)
<p>Horizontal-stalk leaf</p> 	Long single layer PVDF stalk	17 μ W (Wind speed = 6.5m/s.)
<p>Vertical-stalk leaf</p> 	Short single layer PVDF stalk	296 μ W (Wind speed = 8m/s)
	Long single layer PVDF stalk	76 μ W (Wind speed = 3.5m/s)
	Long air-spaced double layers PVDF stalk	119 μ W (Wind speed = 6.5m/s)

Figura 16: Resultados Coletados para os dois experimentos.

Fonte: Li e Lipson (2009).

Para o modelo estudado foram coletados dados quanto a geração de energia de 17 μ W para o caso de estudo com um elemento transdutor curto na posição horizontal com ventos de incidência de velocidade de 6,5 m/s. Para o caso de estudo com transdutor na vertical foram coletados dados de geração de energia variando o vento em 3 m/s, 6,5 m/s e 8 m/s, sendo que foram utilizados para alguns casos transdutores longos e curtos, com um e dois elementos transdutores acoplados. A coleta de energia foi de 296 μ W para ventos de 8 m/s, 76 μ W para ventos de 3,5 m/s e 119 μ W para ventos de 6,5 m/s.

2.4.8 Moinho de Vento Piezoelétrico

O modelo de captura de energia estudado por Priya (2005), trata de um moinho de vento piezoelétrico utilizando transdutores piezoelétricos *bimorph* em frequências baixas (figura 18). Os testes do modelo foram distribuídos em duas fases, sendo que em uma fase foi feita a análise da geração de energia em sinais alternados (AC) e a segunda fase o mesmo circuito contendo um capacitor e uma carga resistiva.

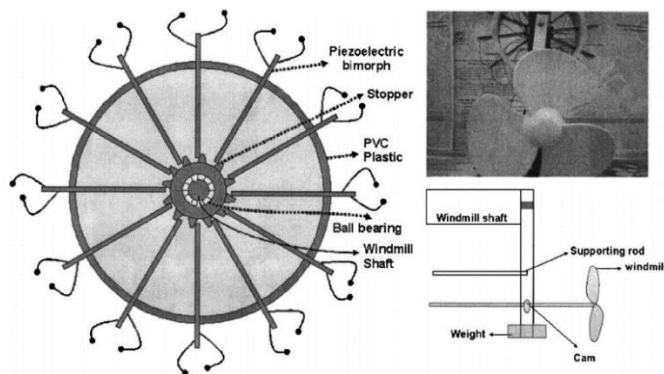


Figura 17: Esquema do moinho de vento piezoelétrico.

Fonte: Prya (2005).

Entre os resultados obtidos a partir do modelo estudado pelo autor, a relação entre quantidade de energia gerada para diferentes cargas resistivas analisando em diferentes frequências de acionamento mostra que a energia gerada possui maiores amplitudes em valores de carga diferentes para o sistema. Tais resultados são apresentados na figura 19.

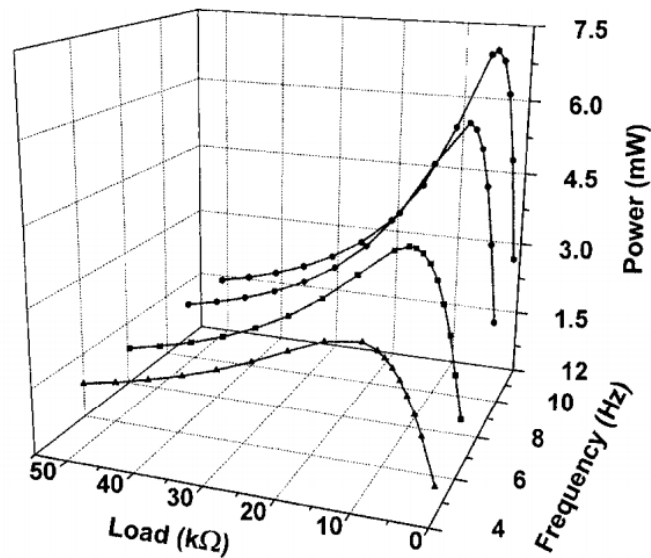


Figura 18: Gráfico da geração de energia variando carga resistiva e frequência.

Fonte: Prya (2005).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do trabalho, foram utilizados transdutores com característica piezoelétrica para a conversão de energia cinética em energia elétrica. A energia cinética foi obtida a partir do contato turbulento do vento com a estrutura do protótipo criado. Quando acionados, os transdutores piezoelétricos geraram sinais elétricos alternados (em polaridades) que foram convertidos em sinais constantes por meio de um sistema retificador de onda completa formado por diodos para que esses sinais fossem analisados (Figura 20).

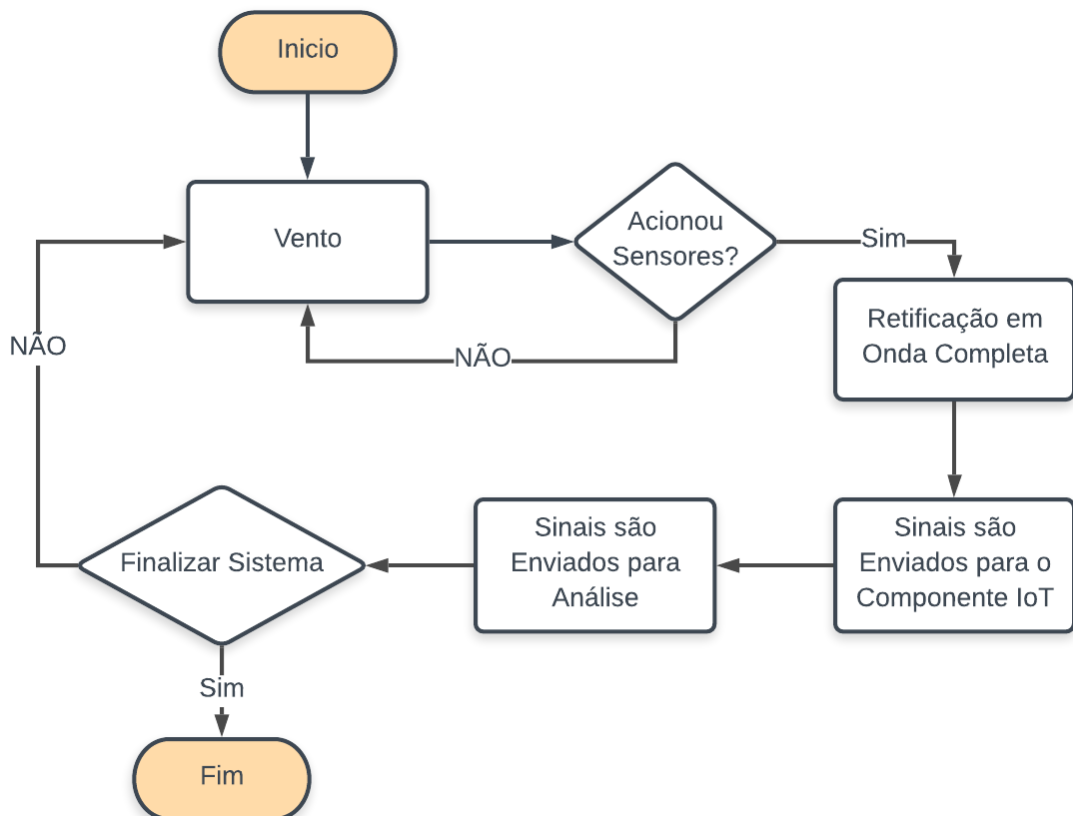


Figura 19: Fluxograma de funcionamento do sistema.

O desenvolvimento foi dividido em duas fases: física e lógica. Mais precisamente, a parte física foi feita planejando os objetos a serem utilizados no decorrer do desenvolvimento, a forma de trabalho, modelagem do sistema, modelagem 3D e disposição dos componentes no protótipo, além dos testes de bancada. Enquanto a fase lógica do projeto tratou a utilização

dos componentes físicos em formação do circuito, formulação de códigos de leitura e envio para plataforma IoT.

3.1 COMPONENTES

3.1.1 Lista de componentes

Quadro 2: Lista de componentes e quantidade utilizada

Item	Quantidade
Transdutor piezoelétrico MEAS	4
ESP32	1
Diodo 1n4148	4
Resistor 1,2 M Ω	1
Diodo Zener	1
Capacitor Eléctrolítico	1
Spinner	1
Célula/Bateria 5V	1
Protótipo impresso em 3D	1
Impressora 3D	1

3.1.2 Transdutor Piezoelétrico MEAS

Como objeto principal para o desenvolvimento do projeto, o transdutor de vibração MEAS, tem como função a conversão de energia cinética em energia eléctrica (Figura 21).



Figura 20: Sensor piezoelétrico MEAS.

Transdutor MEAS apresenta flexibilidade e gera energia quando absorve vibrações ou quando dobrado. É apresentado para um maior o grau de deflexão, uma maior quantidade de tensão a partir de seus polos (Figura 22).

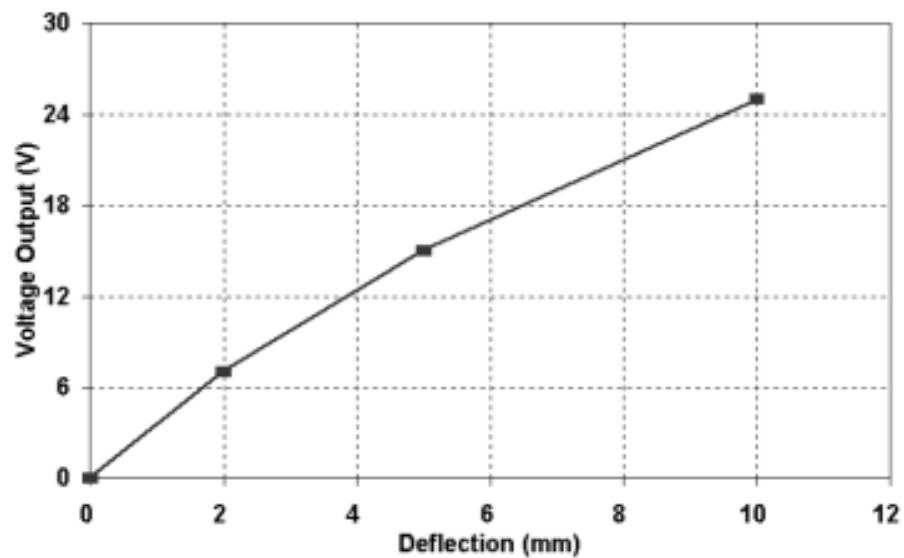


Figura 21: Gráfico de tensão por grau de deflexão.

Fonte: Measurement specialties (2008).

3.1.3 ESP32

Utilizado para coleta de dados sobre a geração de energia e auxiliar como intermediário na análise final do sistema proposto. ESP32 é um componente IoT (*internet of things*) versátil e compacto que possui vantagens em sua utilização como a presença de um módulo *wifi*, um módulo *bluetooth* e é capaz de operar com tensões de entrada entre 2,2V e 3,3V (Figura 23).

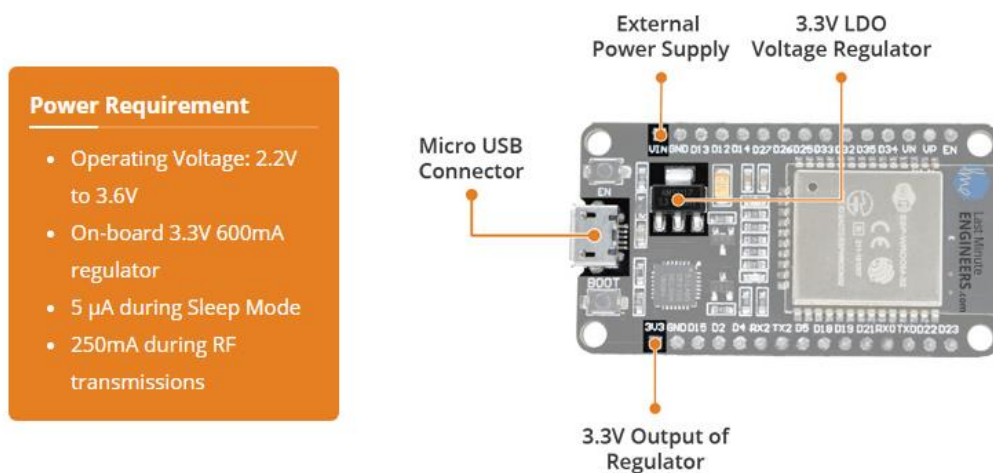


Figura 22: Energia necessária para operar.

Fonte: Last Minute Engineers (2019).

Entre seus periféricos de entrada e saída (Figura 24), podem ser encontrados pinos conversores de sinais digitais para analógicos (ADC) de 12 bits que foram necessários para uma coleta mais precisa de dados sobre a geração de energia.

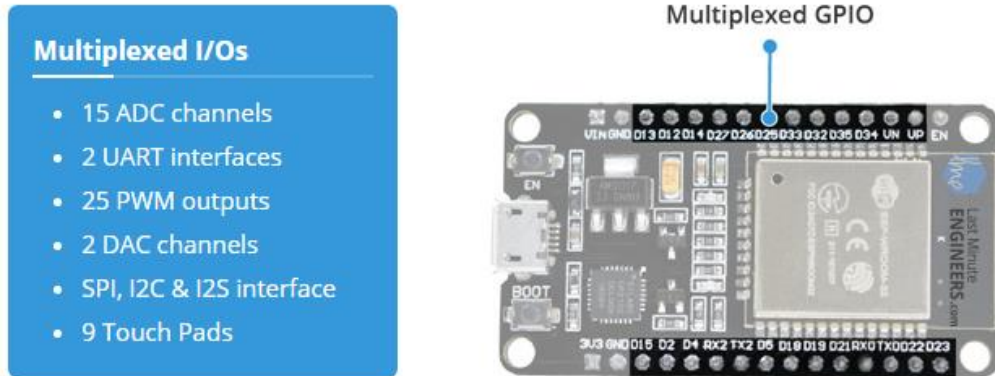


Figura 23: Especificação dos pinos.

Fonte: Last Minute Engineers (2019).

O dispositivo ESP32 possui como característica a possibilidade de atuar em modos em que o consumo de energia pode se tornar diferente, porém a quantidade de elementos atuantes internamente também é limitada em cima do consumo (Quadro 3). Estes modos são chamados de *sleep modes* (modos de repouso) e são estados de economia de energia.

Quadro 3: Especificações dos modos de operação do ESP32

Modo de atuação do dispositivo ESP 32	Quantidade de energia consumida	Elementos ativos	Elementos inativos	Elementos em pausa
Active Mode	160 – 260mA	Todos	-	-
Moder Sleep Mode	3 – 20mA	ESP32 Core, ULP Coprocessor, RTC	Wifi, Bluetooth, Radio, Peripherals	-
Light Sleep Mode	0,8mA	ULP Coprocessor, RTC	Wifi, Bluetooth, Radio, Peripherals	ESP32 Core
Deep Sleep Mode	10 μ A	ULP Coprocessor, RTC	ESP32 Core, Wi-Fi, Bluetooth, Radio, Peripherals	-
Hibernation Mode	2,5 μ A	RTC	ESP32 Core, Wi-Fi, Bluetooth, Radio, Peripherals, ULP Coprocessor,	-

3.2 PROTOTIPAÇÃO DO SISTEMA

A base principal para a geração de energia elétrica com a utilização de transdutores piezoelétricos é a forma como os transdutores se movem, analisando o grau de deflexão e a frequência a qual é submetido. Para isso, foi desenvolvido um protótipo, e impresso por uma impressora 3D em um processo de manufatura aditiva, que alojasse todo o sistema criado com os transdutores piezoelétricos, o circuito retificador de onda completa, a placa de prototipação ESP32, e conseqüentemente colaborasse com a deflexão dos transdutores.

3.2.1 Especificações do Protótipo

As dimensões do corpo do protótipo foram escolhidas de forma a dar espaço suficiente para alojar todos os componentes internamente. Desta forma, foram escolhidas dimensões de 120 (cento e vinte) milímetros tanto na base quanto na altura do protótipo, dando a ele um aspecto de caixa (Figura 25). Foram criados também, pequenos orifícios de 10 (dez) milímetros de diâmetro na base do protótipo para que pudesse ser fixado à algum objeto de suporte.

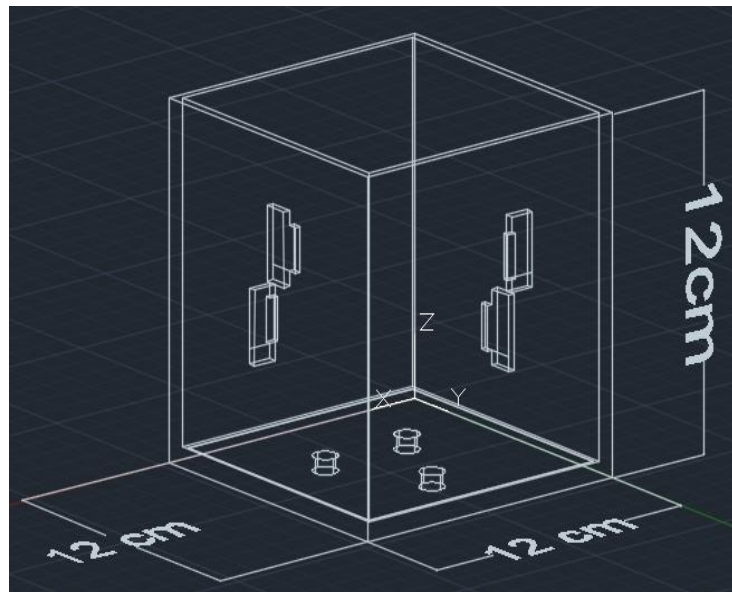


Figura 24: Dimensões do protótipo.

3.2.2 Posicionamento dos Transdutores

O posicionamento dos transdutores piezoelétricos no protótipo foi realizado nos feixes existentes nas laterais e fixados na parede externa, de forma que ele ficasse na posição horizontal lateral, para que sofresse menos com ação da gravidade (Figura 26).

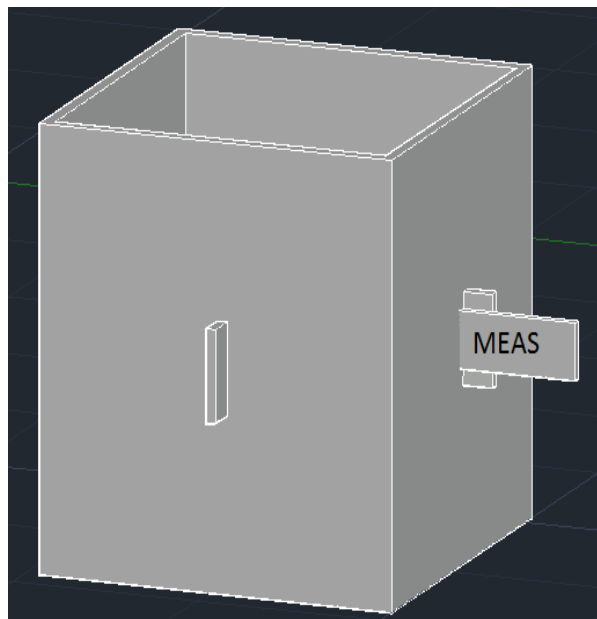


Figura 25: Posição de fixação do transdutor no protótipo.

3.2.3 Folha e Massa

Para auxiliar na deflexão do transdutor, embasado no esquema estudado por Li e Lipson (2009), foi adicionado à extremidade de cada piezoelétrico uma folha de plástico triangular com 120 mm (milímetros) de base e demais medidas de 90 mm, e uma espessura de 0,47 mm. Como pode ser verificado na figura 27, a folha a ser adicionada ao sistema acrescenta massa de 1,4540 g (grama).



Figura 26: Massa da folha triangular.

Após testes realizados com a folha triangular, foi adicionado também à extremidade superior da folha uma porca (peça com furo cilíndrico para parafusos) com massa de 1,0299g (grama). A massa da porca pode ser vista por meio da figura 28.



Figura 27: Massa da porca adicionada

3.2.4 Suporte e Movimento

Tendo em vista que o transdutor piezoelétrico gera energia quando dobrado para ambos os lados a forma de movimentação do protótipo foi planejada para aproveitar esta propriedade. Sendo assim, o suporte escolhido para servir de base para o protótipo foi um *spinner* (Figura 29).



Figura 28: *Spinner* utilizado.

A base de apoio do protótipo impresso possui três orifícios (Figura 25), projetados justamente para a fixação da base na estrutura física do *spinner*. Com a fixação do *spinner* na base do protótipo foi possível criar um movimento de rotação no eixo central fixo em seu rolamento (figura 30). Supõe-se um movimento caótico dos transdutores piezoelétricos com a incidência do vento.

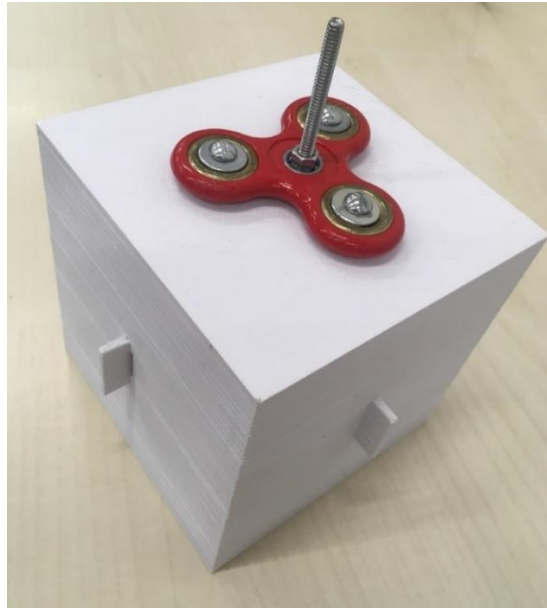


Figura 29: *Spinner* fixado na estrutura do protótipo.

Como pode ser averiguado pela figura 31, foi necessário para a sustentação do protótipo duas bases feitas de madeira.



Figura 30: Protótipo montado.

3.3 TESTES DE BANCADA

3.3.1 Sinais Alternados AC

A princípio, para obter uma determinada ideia da eficiência quanto à geração de energia foram realizados testes de bancada ligando o transdutor piezoelétrico diretamente a um osciloscópio com excitações manuais. Os testes de bancada para sinais alternados foram feitos com três transdutores em paralelo. Foram averiguadas tensões de pico variando até 264 Volts e tensões RMS em torno de 28 Volts (Figura 32).



Figura 31: Gráfico de tensão encontrada no sistema sem cargas e com sinais AC.

3.3.2 Sinais Constantes DC sem Adição de Carga

Para o melhor análise da coleta de energia elétrica sobre os transdutores piezoelétricos foi proposto um circuito onde pudesse ser recolhido valores de tensões constantes (Figura 33). Sendo assim, nos terminais positivo e negativo do transdutor MEAS foi acoplado um sistema retificador de onda completa utilizando diodos “1n4148” de silício em ponte para transformar o sinal AC (corrente alternada) em um sinal DC (corrente contínua), onde para cada sinal de tensão de saída houve uma queda de tensão entre 0,62V de 0,72 Volts (tensão de acionamento do diodo).

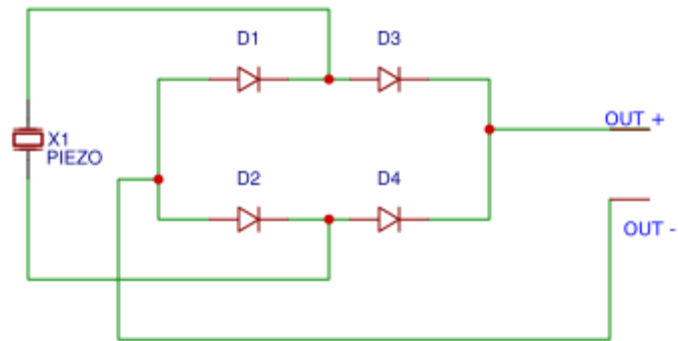


Figura 32: Circuito retificador de onda completa.

Com o circuito retificador de onda completa montado (Figura 33) foram feitas outras análises do comportamento e eficiência do transdutor piezoelétrico utilizando novamente o osciloscópio e com excitação manual. Os testes foram feitos mudando a disposição dos transdutores. Os testes aplicados foram feitos com um, dois e três transdutores em série e paralelo.

Na análise da coleta de energia com o circuito contendo três transdutores piezoelétricos dispostos em paralelo foi verificado tensões de pico de até 148 Volts e tensões RMS de até 40 Volts (Figura 34).



Figura 33: Gráfico de tensão encontrada no sistema sem cargas e com sinais DC dispendo de três transdutores em paralelo.

Na análise da coleta de energia com o circuito contendo três transdutores piezoelétricos dispostos em série foi verificada tensões de pico de até 144 Volts e tensões RMS de até 36 Volts (Figura 35).

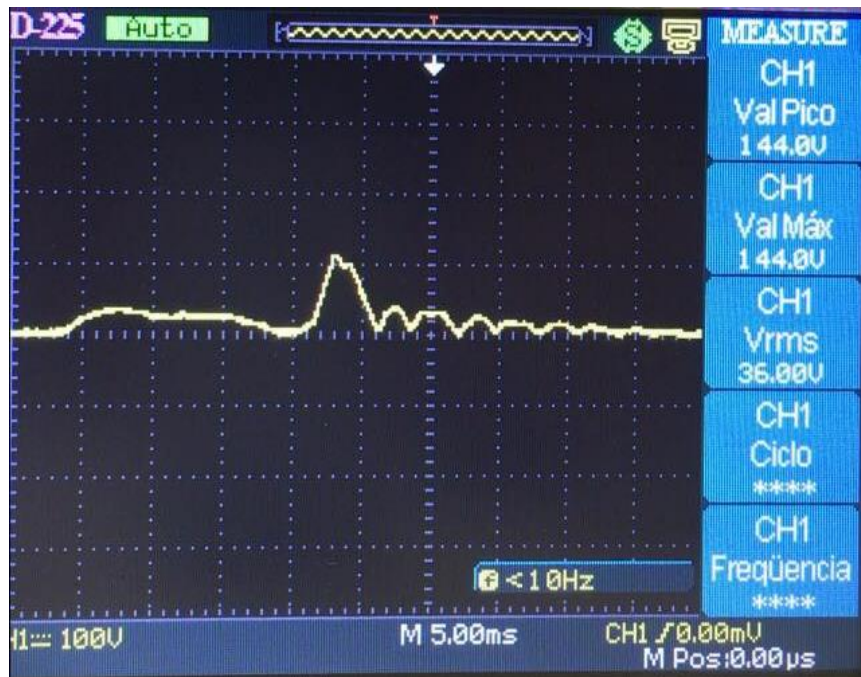


Figura 34: Gráfico de tensão encontrada no sistema sem cargas e com sinais DC dispendo de três transdutores em série.

3.3.3 Fixação dos Transdutores

Seguido da escolha da disposição dos transdutores no circuito foram realizados testes de bancada para se descobrir a posição para a fixação dos transdutores em que se encontraria melhores valores de tensão (Figura 36). Os testes feitos se basearam diretamente na fixação em cada ponto dos transdutores diretamente no protótipo.



Figura 35: Ponto para fixação do transdutor no protótipo.

3.4 LEITURA DOS DADOS

3.4.1 ESP32

Com o circuito proposto montado no interior do protótipo e com a fixação dos transdutores nos feixes laterais, foi então somado ao esquema dispositivos que permitissem a leitura dos sinais DC gerados. Desta forma o ESP32 foi utilizado como ferramenta intermediária entre a leitura da tensão e análise dos dados.

A escolha de um dispositivo IoT (ESP32) para a leitura dos dados foi feita principalmente pela mecânica do sistema desenvolvido. Tendo em vista que o protótipo desenvolvido faz um movimento rotacional para a geração de energia elétrica criou-se uma certa dificuldade para a leitura dos sinais de saída por meio de um osciloscópio ou multímetros convencionais, logo, o ESP32 teve a função de ler e encaminhar os dados para análise.

Foi levada em consideração a quantidade máxima de tensão aceita pelos pinos ADC em modo *input* para que não houvesse danificação do equipamento por meio de uma possível geração extra de energia, por isso foi inserido no circuito, paralelamente aos terminais de saída, uma resistência de 1,2 M Ω (Figura 37). Assim sendo, pôde ser feita a coleta dos dados coletados a partir dos terminais do circuito montado. A adição da resistência nos terminais

permitiu o fácil acesso ao cálculo da potência sobre a carga desejada através da lei de Ohm. Para o cálculo da potência é utilizada a fórmula da Lei de Ohm. Por meio da fórmula de potência pode ser concluído que para valores de tensão constantes, quanto maior a corrente maior a potência encontrada sobre uma carga específica.

Fórmula para cálculo de potência (P) em watts:

$$P = V * I \quad (1)$$

onde,

V: tensão dada em volts;

I: corrente dada em amperes.

A fórmula utilizada para chegar ao cálculo da corrente sobre um resistor:

$$V = R * I \quad (2)$$

$$I = \frac{V}{R} \quad (3)$$

onde,

R: Resistencia dada em Ohm;

I: corrente dada em amperes.

Substituindo a equação (3) na equação (1):

$$P = V * \frac{V}{R} \quad (4)$$

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (5)$$

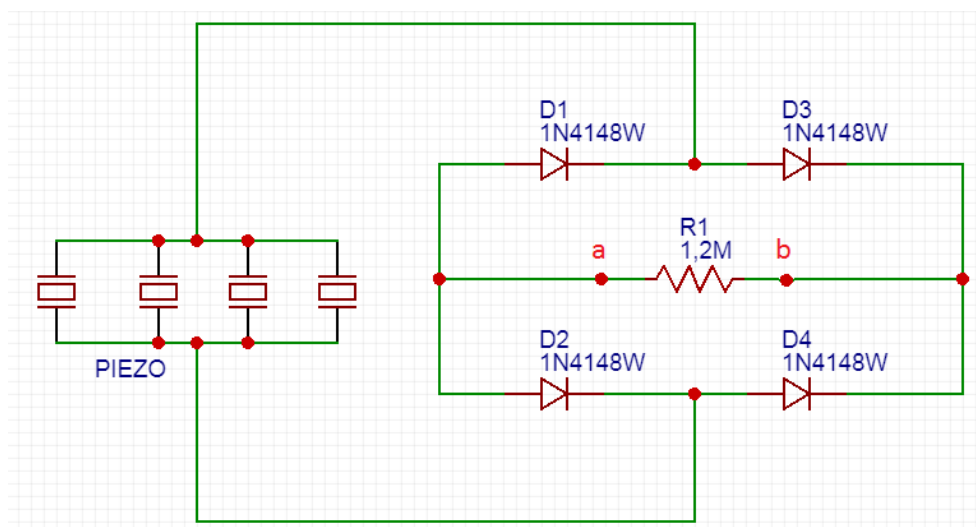


Figura 36: Circuito final para a leitura com ESP32.

3.4.2 Ubidots

Para o manuseio dos dados recolhidos foi utilizado a plataforma *ubidots*. Esta plataforma é utilizada para desenvolver soluções e analisar dados de dispositivos conectados à internet. Por meio desta plataforma os dados podem ser analisados por sua amplitude em função do tempo em gráficos e, também, exportados para arquivos externos. Para a sincronização dispositivo ESP32 com a plataforma *ubidots*, primeiramente, foi desenvolvido um código que permitisse a conexão do ESP32 com a internet. Seguindo com o código de sincronização, foi criado um novo dispositivo na plataforma do *ubidots*. Quando criado o dispositivo, foram utilizados alguns elementos gerados pela plataforma para a conexão e acesso.

A partir das conexões feitas foi realizada a leitura dos dados recolhidos pelo ESP32. Visto que o valor analógico lido tinha amplitude de até 12 bits (0 a 4096) a tensão (V) de entrada foi calculada a partir da fórmula:

$$V = \frac{3,3 * Vin}{4096}$$

onde,

Vin: Valor entre 0 e 4096 lido pelo pino ADC;

4096: Valor máximo de leitura;

3,3: Tensão máxima lido pelo pino ADC.

Como a frequência de leitura dos dados por meio do pino ADC era feita de forma mais rápida que a frequência de geração de energia, foi criado um laço de repetição (*loop*) para eliminar ruídos e obter melhores valores para análise. Tendo o valor de tensão calculado, foi feito o cálculo da potência gerada sobre a carga e foram enviados os dados da potência e tensão para a plataforma do *ubidots*. A figura 38 mostra um fluxograma de funcionamento do algoritmo utilizado.

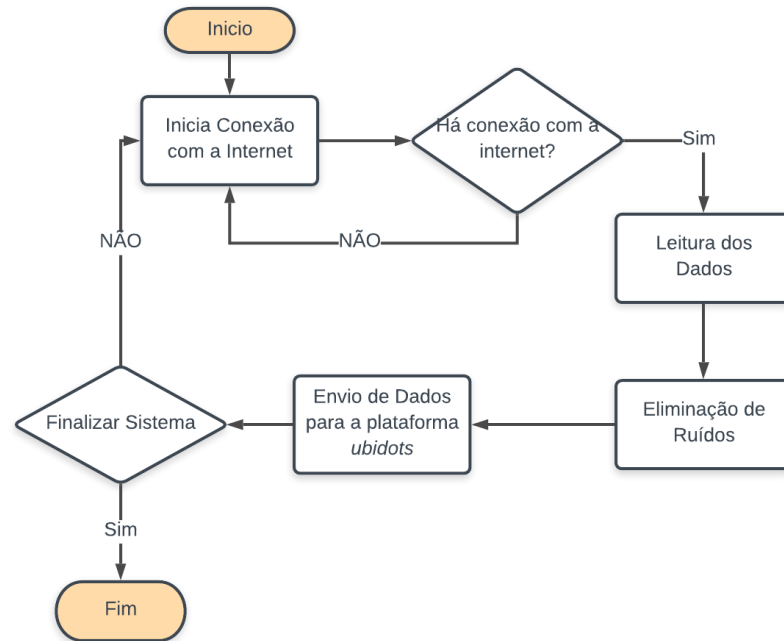


Figura 37: Fluxograma do funcionamento do ESP32 com a plataforma *ubidots*.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Na análise sobre os valores coletados pelo osciloscópio em acoplamento DC não foi notada diferença relevante para a geração de tensão na associação paralela ou em série. A partir das análises feitas, foi decidido que as análises da coleta de energia com o circuito no protótipo seriam apenas com transdutores dispostos em paralelo, buscando maior geração de corrente, e conseqüentemente maior potência na saída.

Para que a decisão sobre a disposição dos transdutores (paralelo) no circuito fosse feita de forma mais garantida, foram adicionados aos testes de bancada um capacitor eletrolítico de 22 μ F (micro-Farads) para armazenamento de carga, um diodo do tipo *zener* para filtragem do sinal de saída e um led de cor azul cujo valor de tensão (V) para acionamento, mínimo, encontrado foi de 2,2 Volts e corrente (I) de 20 mA (miliampères). A razão pela adição dos componentes foi analisar o comportamento do sistema com adição de cargas nos terminais.

Nos dois casos de teste, série e paralelo, apenas o circuito em paralelo foi capaz de gerar potência suficiente para o acionamento do led, auxiliando na escolha da disposição dos transistores. Como a excitação dos transdutores foi feita de forma manual, valores de tensão maiores não puderam ser armazenadas em tempo ábil, porém, pôde ser encontrado um valor de potência sobre a carga do led utilizado por meio da fórmula da potência segundo a Lei de Ohm.

Potência encontrada por meio da equação (1):

$$P = 2,2 * 20 * 10^{-3}$$

$$P = 44mW$$

Foram recolhidos, para cada um dos casos de estudo de geração de energia, três amostras. Os dados foram exportados da plataforma do *ubidots* e introduzidos no software *excel* para a geração de gráficos relacionando a quantidade de tensão e potência gerada.

Foram analisados a quantidade de energia gerada para o sistema sem uma massa extra e com a massa extra. Para o caso com a massa, foi feita análise para ventos com velocidade de 3 e 6,5 m/s (metros por segundo) enquanto para o sistema sem a massa extra foi feita análise apenas com vento de velocidade 6,5 m/s.

Os gráficos apresentados pelas figuras 39, 40 e 41 demonstram quantidade de tensão gerada dada em volts e a quantidade de potência gerada em uma escala de microwatts, ambas

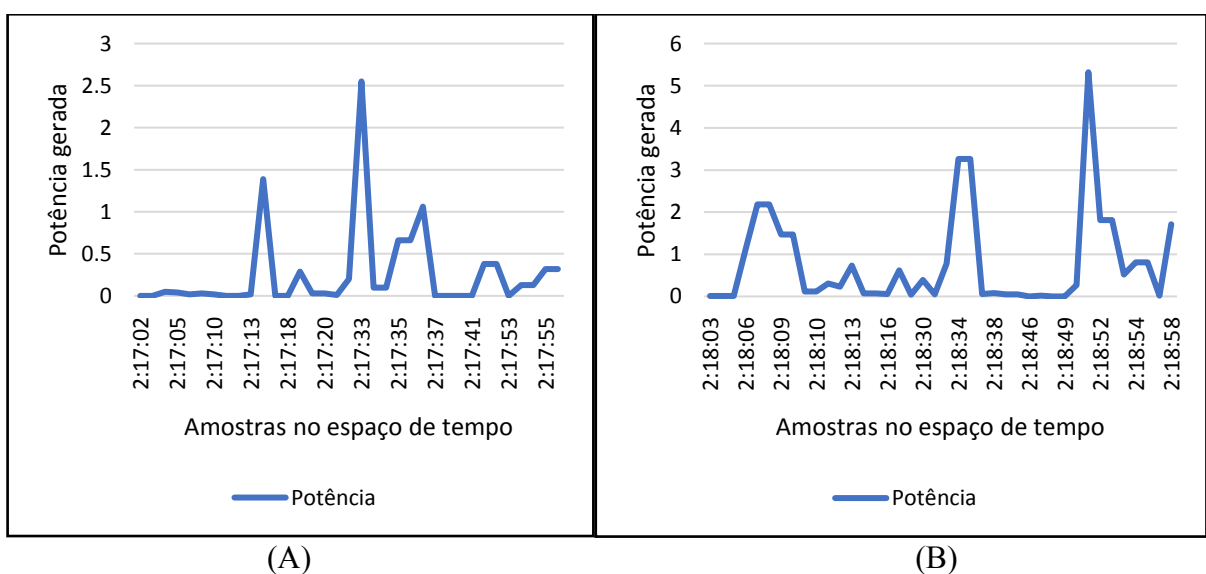
agrupadas e analisadas no espaço de tempo descrita no eixo das abcissas. As figuras 39 e 41 mostram o grau de deflexão dos transdutores nos ensaios produzidos.

Primeiramente, para a análise do sistema sem a massa extra na extremidade, foi observado que com a incidência do vento a folha na extremidade causava uma deflexão na estrutura do transdutor para o lado positivo (lado da incidência do vento), mas sem deflexões aparentes para o lado negativo (lado contrário à incidência do vento). As deflexões encontradas podem ser aferidas por meio da figura 33.



Figura 38: Deflexões encontradas das vigas em relação ao sistema sem massa de prova.

Foram feitos três ensaios coletando valores em um minuto cada (Figura 40) e foi encontrada, para ventos com velocidade de aproximadamente 6,5 m/s (metros por segundo), potência máxima de 5,32 μW (microwatts).



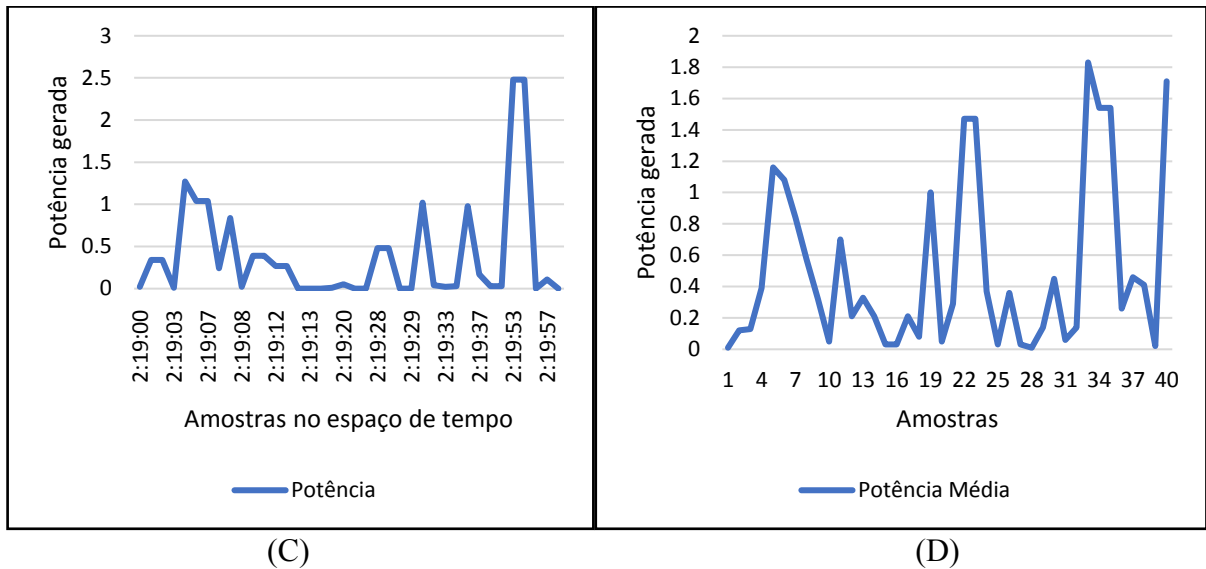


Figura 39: Gráficos de amostras (A), (B) e (C) representam valores de potência e tensão no espaço de tempo nos minutos 17, 18 e 19 respectivamente; Gráfico (D) de potência e tensão média dos três ensaios efetuados.

Com a análise feita sobre os gráficos apresentados pela figura 34 pôde-se notar que grande parte dos valores de potência estavam próximos de zero, fazendo com que a potência média fosse baixa mesmo obtendo alguns valores de pico altos. Baseado em uma análise sobre a figura 33, fica clara a importância da melhor utilização dos componentes, procurando aumentar a amplitude da deflexão dos transdutores e também tentar causar deflexões tanto positivamente quanto negativamente.

Assim como para o sistema sem massa extra, foi feita a análise do sistema com a massa extra na extremidade, e a partir desta análise foi observado que com a incidência do vento a folha na extremidade causava uma deflexão na estrutura do transdutor tanto para o lado positivo quanto para o lado negativo (figura 41).



Figura 40: Deflexões encontradas.

A princípio, comparando a deflexão encontrada, mostrada na figura 39 com as deflexões mostradas por meio da figura 41, pode-se ter noção de um maior aproveitamento da movimentação dos transdutores. Em relação a deflexão do transdutor, a adição da massa na extremidade da folha mostrou um ganho substancial se comparado ao sistema sem a massa.

Foram feitos três ensaios coletando valores em um minuto cada e foi encontrada, para ventos com velocidade de aproximadamente 6,5 m/s (metros por segundo), potência máxima de 3,24 μW (microwatts) e pode ser verificado por meio da figura 42.

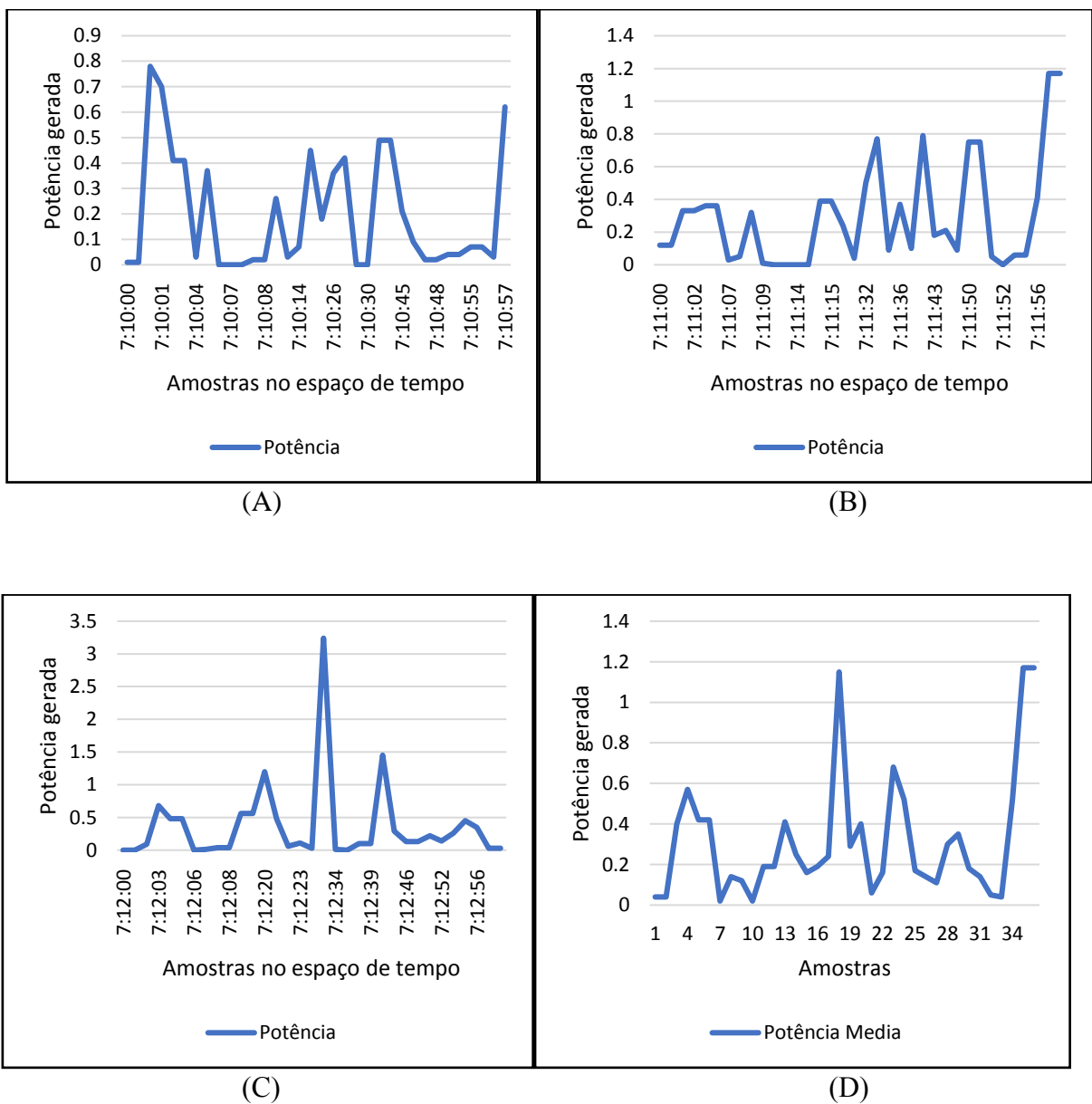
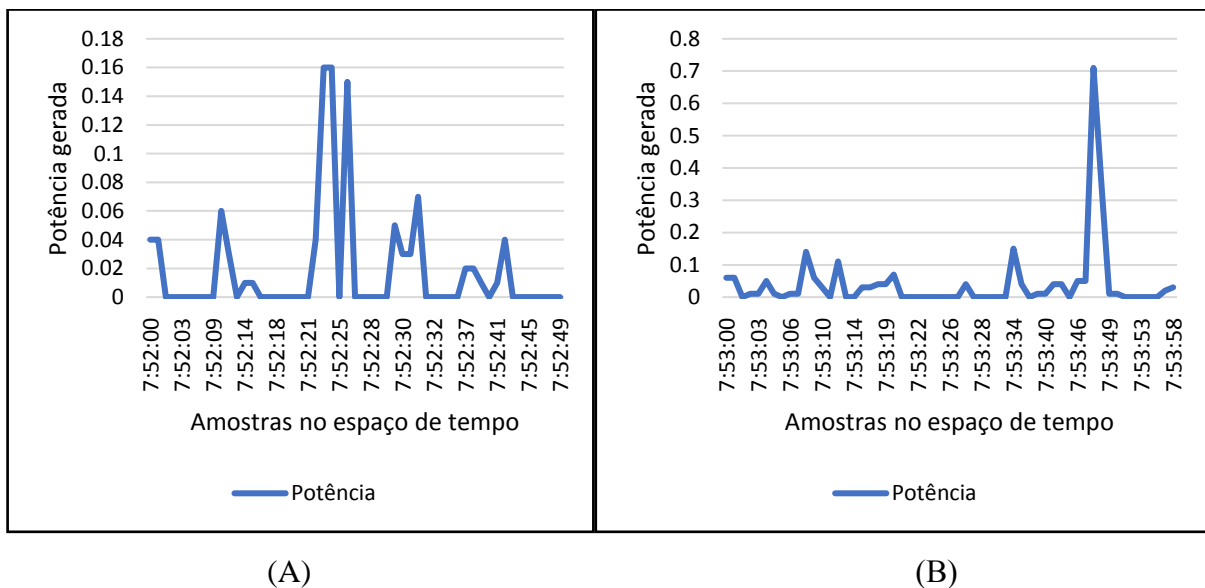


Figura 41: Gráficos de amostras (A), (B) e (C) representam valores de potência no espaço de tempo nos minutos 10, 11 e 12 respectivamente; Gráfico (D) de potência média dos três ensaios efetuados.

Com a análise feita sobre os gráficos apresentados pela figura 36 foi averiguado uma maior proporção de geração de energia se comparado às amostras coletadas pelos testes sem o incremento de uma massa na extremidade da folha. Mesmo com o maior valor de potência sendo inferior ao valor encontrado nos ensaios do item anterior a quantidade de energia gerada se mantém com valores maiores no decorrer do tempo, logo o sistema demonstra maior estabilidade para este caso de testes. Correlacionando os dados dos gráficos para o teste com massa e com ventos de incidência com velocidades de 6,5 m/s, fica evidente que as deflexões positivas e negativas corroboraram com os dados encontrados, dando um ganho na geração média de energia.

Foram feitos, em seguida, três ensaios coletando valores em um minuto cada e foi encontrada, para ventos com velocidade de aproximadamente 3 m/s (metros por segundo), potência máxima de 0,71 μW (microwatt). Como pode ser verificado por meio da figura 43.



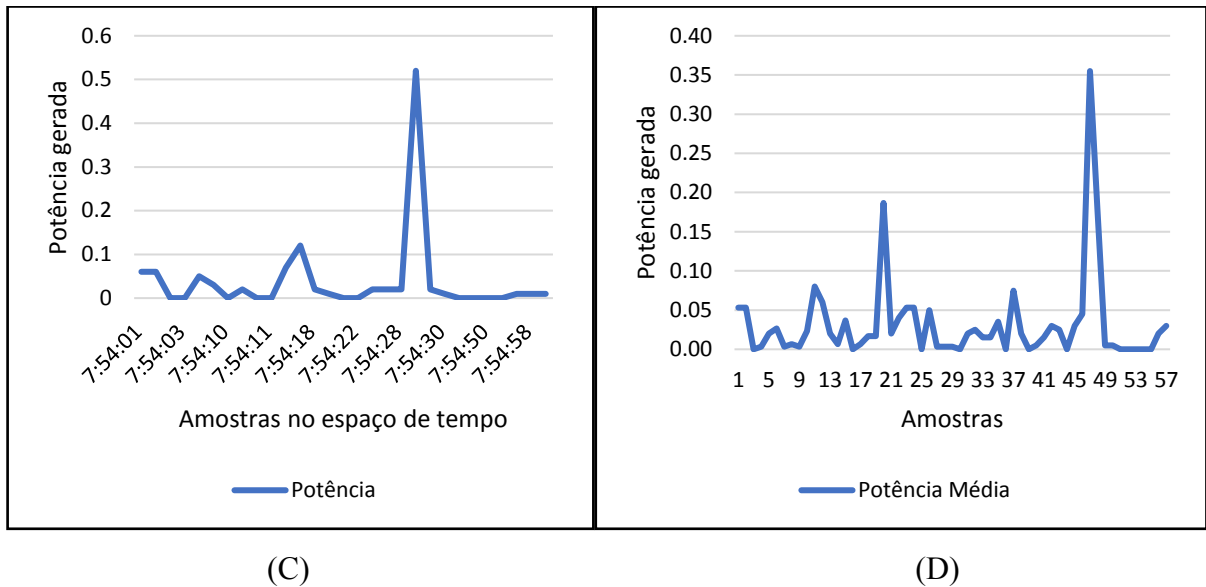


Figura 42: Gráficos de amostras (A), (B) e (C) representam valores de potência no espaço de tempo nos minutos 52, 53 e 54 respectivamente; Gráfico (D) de potência média dos três ensaios efetuados

Os ensaios realizados com ventos de velocidade de 3 m/s se mostraram menos produtivos se comparados aos ensaios anteriores. Com análise dos gráficos apresentados pela figura 43 é perceptível a baixa na média de geração de energia já que grande parte de seus valores de potência se mantiveram com valores inferiores à 0,2 μW . Por meio da figura 44 pode ser notado a relação entre os gráficos de geração média de energia entre os três ensaios de cada fase de teste.

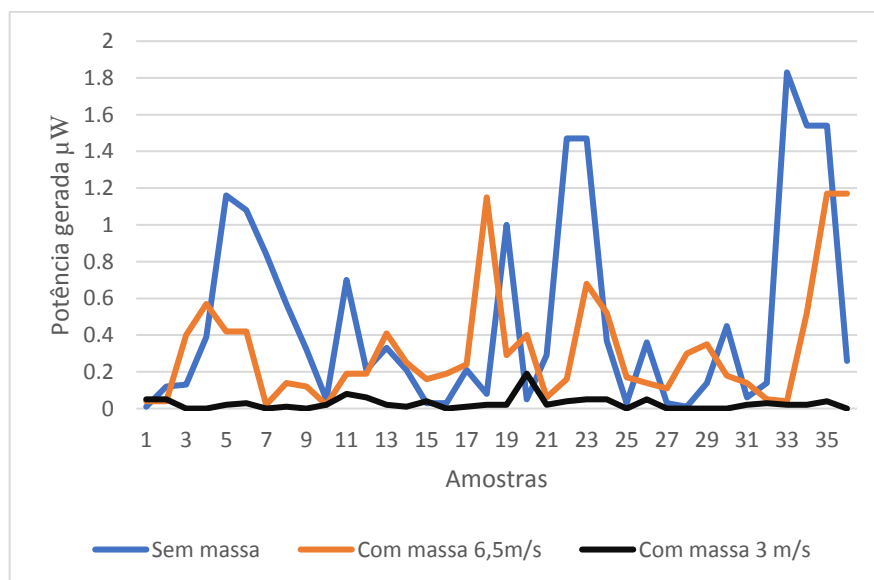


Figura 43: Gráfico que representa as médias de potência entre os ensaios.

Para maior clareza quanto a geração de energia, a figura 45 demonstra os dados médios de tensão coletada entre as amostras dos casos de testes.

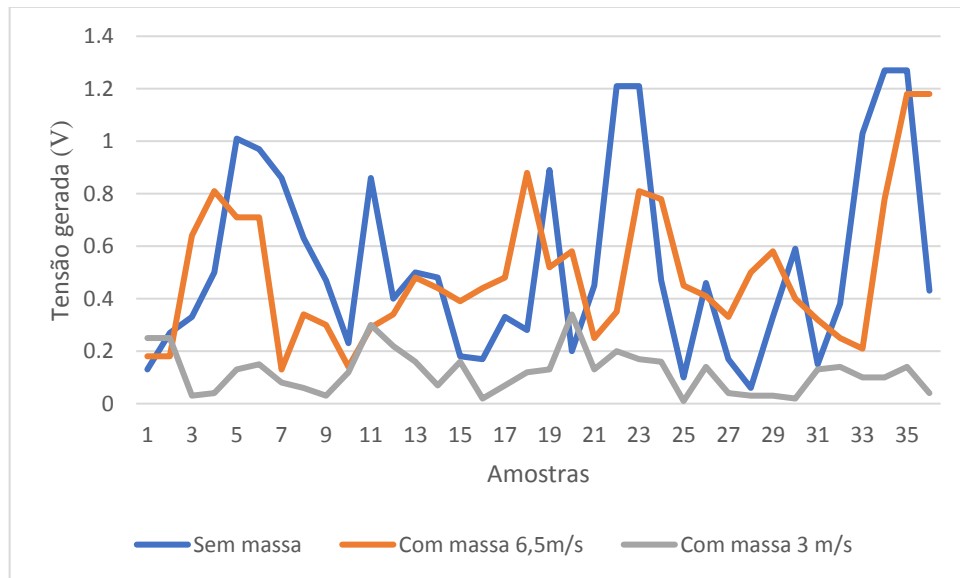


Figura 44: Gráfico que representa as médias de tensão geradas entre os ensaios

Os resultados apresentados para os sistemas estudados (quadro 4) mostram maior eficiência do sistema para geração de energia com valores de velocidade do vento maior, inclusive também, maior ganho quanto a movimentação dos transdutores.

Quadro 4: Resultados encontrados para os sistemas

Sistema	Velocidade do Vento	Deflexão	Potência Máxima	Potência Média
Sem Massa Extra	6,5	Positiva	5,32 μ W	0,50 μ W
Com Massa Extra	3,0	Positiva/Negativa	0,71 μ W	0,03 μ W
Com Massa Extra	6,5	Positiva/Negativa	3,24 μ W	0,32 μ W

5 CONCLUSÃO

No início da pesquisa, foi mostrado a importante necessidade do desenvolvimento de novas fontes geradoras de energia elétrica que operassem de forma sustentável. Logo, é importante o estudo sobre a prototipação de um gerador de energia piezoelétrica que aproveita o potencial eólico. Assim sendo, constata-se que o objetivo geral foi atendido, sendo que o trabalho pode produzir um protótipo de geração de energia utilizando transdutores piezoelétricos.

O primeiro objetivo específico do trabalho tratava de um estudo sobre a piezoeletricidade e foi realizado em conjunto ao segundo objetivo, que tratava o estudo do comportamento dinâmico do sistema proposto, para dar seguimento ao protótipo e verificar se este era viável e se haviam outros trabalhos semelhantes que dariam fundamento ao desenvolvimento deste trabalho.

O objetivo seguinte, que era a realização de testes sobre a disposição dos transdutores piezoelétricos no esquema elétrico, foi realizado com sucesso em conjunto ao quarto objetivo que tratava a análise da geração de energia elétrica fora do protótipo desenvolvido, em testes de bancada utilizando osciloscópio.

O último objetivo específico solicitava uma análise sobre a geração de energia piezoelétrica utilizando o protótipo construído e foi realizado com êxito, extraindo os dados de geração de energia de plataformas IoT e construindo gráficos pelo software *excel*.

Conclui-se que a geração de energia utilizando o protótipo desenvolvido foi eficiente com potências máximas variando até aproximadamente $5 \mu\text{W}$ e ventos de incidência de 6 m/s . Dentre os casos de testes feitos pode-se concluir também que a velocidade de vento de incidência e intensidade do movimento rotacional do protótipo influenciam na excitação dos transdutores sendo que o sistema se mostrou menos produtivo para ventos de menor velocidade. Tem-se como conclusão também que a adição de massa na extremidade causa um movimento desbalanceado no transdutor com a folha e aumenta o grau de deflexão do transdutor em conjunto com a folha.

Como trabalhos futuros, sugere-se a análise do comportamento dinâmico do sistema utilizando um número maior de dispositivos transdutores piezoelétricos e com meios de excitação controláveis com ventos em maior e menor velocidade.

REFERÊNCIAS

DA SILVA FERREIRA, Sávio; DA SILVA, Ducilene Melo. Materiais piezoelétricos na geração de energia limpa. **Revista Ceuma Perspectivas**, v. 27, n. 1, p. 72-80, 2016.

DE OLIVEIRA, Sérgio. **Internet das Coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry Pi**. Novatec Editora, 2017.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos avançados**, v. 21, n. 59, p. 7-20, 2007.

GUBBI, Jayavardhana et al. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. **Future generation computer systems**, v. 29, n. 7, p. 1645-1660, 2013.

GUINARD, Dominique; TRIFA, Vlad. **Building the web of things: with examples in node.js and raspberry pi**. Manning Publications Co., 2016.

HARROP, Peter. **Webinar: Energy Harvesting Microwatt to Megawatt: New Objectives, New Solutions**. IDTechEx Research. 2019.

HOBECK, J. D.; INMAN, D. J. Artificial piezoelectric grass for energy harvesting from turbulence-induced vibration. **Smart Materials and Structures**, v. 21, n. 10, p. 105024, 2012.

ILIUK, Itamar. Fenômenos não-lineares, incluindo-se os não-ideias, em captura de energia utilizando-se dispositivos piezoelétricos. 2012.

ILIUK, I. et al. **Application of passive control to energy harvester efficiency using a nonideal portal frame structural support system**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2013a.

ILIUK, I. et al. A non-ideal portal frame energy harvester controlled using a pendulum. **The European Physical Journal Special Topics**, v. 222, n. 7, p. 1575-1586, 2013b.

JAFFE, Bernard; COOK William R; JAFFE, Hans. **Piezoelectric ceramics**. Elsevier, 2012.

JALILI, Nader. **Piezoelectric-based vibration control: from macro to micro/nano scale systems**. Springer Science & Business Media, 2009.

LAST MINUTE ENGINEERS. **Insight into ESP32 Features & Using it with Arduino IDE**. 2019. Disponível em: <<https://lastminuteengineers.com/esp32-arduino-ide-tutorial/>>

LEICHTWEIS, Jandira; PALACIOS FELIX, Jorge Luis. **Métodos de conversão elétrica a partir do meio ambiente: aproximação sustentável**. Jornada de iniciação científica e tecnológica, [S.l.], v. 1, n. 7, out. 2017.

LI, Shuguang; LIPSON, Hod. Vertical-stalk flapping-leaf generator for wind energy harvesting. In: **ASME 2009 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems**. American Society of Mechanical Engineers, 2009. p. 611-619.

MARSAL, Paulo Henrique Mello. **Energia e Meio ambiente**. Ago. 2011.

MEASUREMENT SPECIALTIES. **LDT with Crimps Vibration Sensor/switch**. 2008. <https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/robocore-lojavirtual/433/LDT_Series.pdf>

NAZARIO, Felipe Augusto; ILIUK, Itamar. **Estudo das vibrações não lineares sobre fonte de excitação não-ideal para captura de energia piezoelétrica**. Sicite. 2018.

PACHECO, Fabiana. Energias Renováveis: breves conceitos. **Conjuntura e Planejamento**, v. 149, p. 4-11, 2006.

PEREIRA, Antônio Henrique Alves. Cerâmicas piezoelétricas: funcionamento e propriedades. **São Carlos: ATCP Engenharia Física**, 2010.

PRIYA, Shashank. Modeling of electric energy harvesting using piezoelectric windmill. **Applied Physics Letters**, v. 87, n. 18, p. 184101, 2005.

SANTOS, Bruno P. et al. Internet das coisas: da teoria a prática. **Minicursos SBRC-Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**, 2016.

SCHWENGBER, B. H.; NAZÁRIO, F. A.; ILIUK, I. Sintetizador digital. In: SEMANA TECNOLÓGICA ACADÊMICA DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO DA UTFPR-SH, 3., 2016, Santa Helena, PR. **Anais...**, Santa Helena: UTFPR, 2016. p.38-45. Disponível em: <<http://sh.utfpr.edu.br/setac/Anais2016.pdf>>.

SILVA, A. P., SILVA, D. M., FERREIRA, M. L. S., DA COSTA, M. C., CORRÊA, P. A., **Piezoelétricidade, Trabalho de integralização apresentado ao Departamento de Química da Universidade de Uberaba, Universidade de Uberaba, Uberaba – MG**, 2009.

SILVA, Pedro Paulo Santos da. Soluções Estacionárias dos Sistemas Piezoelétricos. 2010. Disponível em: <<http://www.ppgme.ufpa.br/doc/diss/pedropaulosantos.PDF>>. Acesso em: out. 2018.

TRIPLETT, Angela; QUINN, D. Dane. The effect of non-linear piezoelectric coupling on vibration-based energy harvesting. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 20, n. 16, p. 1959-1967, 2009.

TUSSET, Angelo Marcelo; BALTHAZAR, José Manoel; FELIX, Jorge Luis Palacios. On elimination of chaotic behavior in a non-ideal portal frame structural system, using both passive and active controls. **Journal of Vibration and Control**, v. 19, n. 6, p. 803-813, 2013.

VIEIRA, Rafael Gama. A piezoelectricidade no cotidiano. 2013. Disponível em: <<http://parquedaciencia.blogspot.com.br/2013/08/a-piezoelectricidade-no-cotidiano.html>>. Acesso em: out. 2018.

XIA, Feng et al. Internet of things. **International Journal of Communication Systems**, v. 25, n. 9, p. 1101-1102, 2012.